



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

## **Tese de Doutorado**

### **DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA MINIMIZAÇÃO DO CUSTO TOTAL DA OPERAÇÃO DE TRANSPORTE DE PETRÓLEO VIA MARÍTIMA**

**Paulo Aliberto Barros Pucu**

**Campina Grande, fevereiro de 2015**

# **DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA MINIMIZAÇÃO DO CUSTO TOTAL DA OPERAÇÃO DE TRANSPORTE DE PETRÓLEO VIA MARÍTIMA**

Paulo Aliberto Barros Pucu

Tese a ser apresentada ao curso de  
pós-graduação em engenharia  
química como parte dos requisitos  
para obtenção do título de doutor  
em engenharia química.

**Orientador:** Prof. Romildo Pereira Brito

Campina Grande, Fevereiro de 2015

# **DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA MINIMIZAÇÃO DO CUSTO TOTAL DA OPERAÇÃO DE TRANSPORTE DE PETRÓLEO VIA MARÍTIMA**

Paulo Aliberto Barros Pucu

Tese defendida e julgada em 24/ 02 / 2015

---

Orientador Prof. Dr. Romildo Pereira Brito

---

Prof. Dr. Michel Francois Forsy

---

Prof. Dr. José Nilton Silva

---

Prof. Dr. Luis Gonzaga Sales Vasconcelos

---

Prof. Dra. Karoline Dantas Brito

Campina Grande, fevereiro de 2015.

*Dedico este trabalho a todos que me auxiliaram nessa etapa, entre amigos, professores, meu orientador, a minha família, e em especial minha esposa que sempre me auxiliou de várias formas para esta conquista.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu Senhor Jesus Cristo por proporcionar minha existência e sua misericórdia para me auxiliar na minha jornada;

A minha esposa Aline por sempre me apoiar e me auxiliar, mostrando sempre carinho, respeito e amor comigo e com minhas decisões;

Aos meus pais por terem me educado e me apoiado na minha empreitada;

Aos meus irmãos por estarem sempre ao meu lado;

Ao Professor Romildo Brito que demonstrou grande ajuda na orientação;

A Professor João Inácio por ter dado a base da pesquisa no mestrado;

A Professora Karoline Dantas Brito pelo auxílio na revisão da Tese;

As instituições que auxiliaram financeiramente, ou através de dados técnicos permitindo a continuidade a pesquisa;

A todos profissionais que contribuíram direta ou indiretamente com esse projeto.

## RESUMO

O Brasil possui atualmente 115 plataformas de petróleo, sendo 79 fixas e 34 flutuantes, com capacidade de produção de 2,1 milhões de barris diários de petróleo. Diante desta produção torna-se necessária uma estratégia eficiente para a distribuição deste petróleo para as refinarias, onde será processado e refinado. O petróleo proveniente das plataformas é transportado para as refinarias através de navios ou dutos, sendo que grande parte do custo operacional de produção é devido ao seu transporte. Por este motivo a minimização do custo de transporte é extremamente importante. Este trabalho tem por objetivo, utilizando a técnica de programação matemática (Programação Linear Inteira Mista – PLIM), reduzir os custos decorrentes do sistema de transporte. O modelo consiste em uma frota heterogênea de navios, os quais apresentam compartimentos que só podem ser ocupados por um único tipo de produto em cada viagem. Inicialmente são geradas todas as possíveis rotas e, posteriormente, selecionados os navios, associados às respectivas rotas, de forma a atender as demandas das refinarias e a necessidade de retirada de petróleo dos tanques de armazenamento das plataformas. Para a implementação do modelo foi utilizado o software GAMS (General Algebraic Modeling System), juntamente com os *solvers* de otimização CPLEX e BONMIN.

**Palavras chaves:** *Otimização Combinatória, Programação Linear Inteira Mista, Transporte Marítimo, Engenharia de Produção, Offshore.*

## ABSTRACT

Currently, Brazil has 115 petroleum platforms, been 79 fixed and 34 floating, with daily production capacity of 2.1 million barrels of oil. Given this production is necessary a strategy for the efficient distribution of oil to refineries, where it will be processed and refined. Oil from the platforms is transported to refineries through pipelines or ships, with much of the operational cost of production is due to transport. For this reason the minimization of the cost of transport is extremely important. This work has for objective, using the technique of mathematical programming (linear mixed integer programming - LMIP), reduce costs arising from transport system. The model consists of a heterogeneous fleet of ships, which have compartments that can only be occupied by a single type of product on each trip. Initially are generated all possible routes and then selected the vessels, associated with their routes in order to attend the demand of refineries and the need for removal of oil in the storage tanks of the platforms. For the implementation of the model was used the software GAMS (General Algebraic Modeling System), together with the solvers of CPLEX and BONMIN optimization. The results were satisfactory.

**Keywords:** *combinatorial optimization, mixed integer linear programming, sea transport and production engineering, offshore,*

## **LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 1 – Média do número de navios e da tonelage por década	27
FIGURA 2 – Fluxos logísticos na indústria do petróleo	31
FIGURA 3 – Mapa de localização das refinarias brasileiras	34
FIGURA 4 – Capacidade das refinarias brasileiras	34
FIGURA 5 – Grafos de transporte nas origens e nos destinos	42
FIGURA 6 – Simplex Vs Pontos interior	48



## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 – Cálculo do grau API	22
EQUAÇÃO 2 – Função objetivo para um modelo de programação linear	41
EQUAÇÃO 3 – Restrição 1 programação linear	41
EQUAÇÃO 4 – Restrição 2 programação linear	41
EQUAÇÃO 5 – Restrição n programação linear	41
EQUAÇÃO 6 – Função objetivo para um modelo de redes	42
EQUAÇÃO 7 – Restrição 1 (oferta)	42
EQUAÇÃO 8 – Restrição 2 (demanda)	42
EQUAÇÃO 9 – Restrição 3 para variável	42
EQUAÇÃO 10 – Avaliação da análise de sensibilidade absoluta	49
EQUAÇÃO 11 – Avaliação da análise de sensibilidade relativa	49
EQUAÇÃO 12 – Função objetivo	53
EQUAÇÃO 13 – Atendimento da demanda de petróleo	53
EQUAÇÃO 14 – Tempo máximo de operação de cada navio	53
EQUAÇÃO 15 – Cada compartimento seja ocupado por um tipo de óleo	53
EQUAÇÃO 16 – A quantidade levada não ultrapasse a capacidade do navio	54
EQUAÇÃO 17 – O volume transportado em cada compartimento seja menor que a capacidade do mesmo	54
EQUAÇÃO 18 – Restrição para o comprimento do navio	54

EQUAÇÃO 19 – Restrição para o calado do navio	54
EQUAÇÃO 20 – Restrição para a quantidade de óleo que deve ser transportado	54
EQUAÇÃO 21 – Cálculo geração das rotas	56

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Classificação de petróleos pela densidade	23
TABELA 2 – Resolução método Simplex	45
TABELA 3 – Características dos navios	56
TABELA 4 – Geração das rotas	57
TABELA 5 – Custo associado aos navios	58
TABELA 6 – Quantidade média de óleo produzido nas plataformas	58
TABELA 7 – Capacidade máxima de processamento das refinarias ( $m^3$ )	58
TABELA 8 – Demanda mínima de óleo das refinarias ( $m^3$ ).	59
TABELA 9 – Rotas utilizadas solver CEPLEX	59
TABELA 10 – Rotas utilizadas solver BONMIN	60
TABELA 11 – Tempo necessário de escoamento dos óleos produzidos nas Plataformas solver CEPLEX	62
TABELA 12 – Tempo necessário de escoamento dos óleos produzidos nas Plataformas solver BONMIN	63
TABELA 13 – Volume de óleo transportado pelos navios solver CEPLEX	64
TABELA 14 – Volume de óleo transportado pelos navios solver BONMIN	65
TABELA 15 – Dado de saída dos dois problemas apresentado solver CEPLEX	66
TABELA 16 – Dado de saída dos dois problemas apresentado solver BONMIN	66
TABELA 17 – Análise de Sensibilidade vazão de bombeamento média	68
TABELA 18 – Análise de Sensibilidade velocidade média	68

TABELA 19 – Análise de Sensibilidade capacidade média	68
TABELA 20 – Análise de Sensibilidade horizonte de janela de tempo	69

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	15
CAPÍTULO 2 - OBJETIVO	17
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivo Específico	17
2.3 Escolha do Tema: Contribuição Técnico-Científica	17
CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Petróleo	19
3.2 Transporte marítimo	24
3.3 Logística do petróleo	29
3.4 Refinarias	32
3.4.1 Estado atual da atividade de refino	33
3.5 Pesquisa operacional	34
3.6 Métodos matemáticos para otimização	39
3.6.1 Programação linear	39
3.6.2 Problema de transportes (REDES)	41
3.6.3 Programação inteira	42
3.7 GAMS	43
3.7.1 CEPLEX	44
3.7.2 BONMIN	46
3.10 Análise de sensibilidade	49

CAPÍTULO 4 – MODELO MATEMÁTICO	50
4.1 Índices	50
4.2 Conjuntos	51
4.3 Parâmetros	51
4.4 Variáveis	51
4.5 Equações	52
4.5.1 Função Objetivo	52
4.5.2 Restrições	52
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS	56
CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	67
6.1 Analise de Sensibilidade sobre o horizonte de tempo	69
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
CAPÍTULO 8 – PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
ANEXO	78

## 1. INTRODUÇÃO

À medida que a economia mundial torna-se mais globalizada, o aumento dos serviços de transporte de produtos passa a representar uma parcela significativa nos custos das empresas, tornando-se imprescindível a existência de uma logística de transporte. Diante dessa mudança na economia mundial, percebe-se a importância da logística como a ciência que adapta os meios disponíveis e as formas estratégicas para o alcance dos propósitos das organizações comerciais. Nesse processo de distribuição de mercadorias, o transporte é fator relevante, pois o frete pode absorver até 2/3 dos custos logísticos (BALLOU, 1993). Quando não existe um bom sistema de transporte, o mercado fica reduzido e limitado às cercanias dos locais de produção.

A demanda do petróleo e de seus derivados teve um forte crescimento nos últimos anos, tornando o mercado cada vez mais competitivo, o que estimula as empresas a buscarem estratégias para organizar suas atividades, visando o melhor resultado econômico. A logística torna-se fundamental no caso de escoamento de petróleo: um atraso neste setor pode representar vários danos como, perda de tempo e falta de recursos; por outro lado, a entrega antecipada implica em um excesso de inventário. Neste sentido, é de fundamental importância o planejamento para este setor, já que este representa uma apreciável parcela no custo de comercialização das empresas. No transporte brasileiro sempre houve uma predominância do modal rodoviário, pois o governo investiu durante décadas na construção de estradas e incentivou o desenvolvimento do transporte rodoviário. Atualmente, o modal rodoviário representa mais de 60% da movimentação de cargas. No entanto, no caso de transporte de petróleo, o transporte marítimo é uma solução mais econômica, devido às viagens de longas distâncias, em especial para o caso de produção de petróleo *offshore* (exploração de petróleo próxima à costa). Neste contexto, a utilização de um modelo matemático para otimização de transporte via transporte marítimo é de suma importância na redução de custo das empresas petrolíferas.

Através da análise da sensibilidade, é possível avaliar todos os parâmetros que influenciam as variáveis de decisão do modelo matemático, visualizando como as variáveis se comportam, melhorando a análise do modelo, para obter um ótimo mais próximo do

ótimo global da função objetiva que está sujeita às restrições técnica e comercial de processo de transporte.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo da distribuição de petróleo das refinarias até seus pontos receptores, através de uma frota de navios, utilizando um modelo matemático que minimizem o custo total de operação.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Identificar o melhor conjunto de rotas associada a cada navio, de tal forma a minimizar o custo do transporte, levando em consideração parâmetros específicos, como:

- Velocidade de cada navio;
- Vazão de bombeamento de cada navio;
- Volume total de cada navio;
- Dimensões externas para cada navio (calado e comprimento).

Para executar tal tarefa, foram utilizados dois métodos matemáticos para resolução do problema, Simplex e Pontos Interiores.

### **2.3. Escolha do Tema: Contribuição Técnico-Científica**

O que determinou a escolha do tema em estudo foi o fato da maior parte das pesquisas realizadas abordar somente o aspecto da exploração e produção do petróleo; enquanto a logística de transporte tem sido pouco abordada. O sistema logístico começa no planejamento das necessidades dos insumos e tem seu fim quando o produto terminado chega ao cliente final; na indústria de petróleo vai desde o momento de sua exploração até a sua chegada em uma refinaria ou até a estação coletora mais próxima.

O sistema logístico de transporte é o meio de mover mercadorias ou pessoas de um ponto a outro; neste caso, o petróleo é a mercadoria, sendo levado dos campos de produção até a estação coletora mais próxima. Este sistema representa o elemento mais importante das despesas logísticas na maioria das empresas e tem papel fundamental na prestação de serviço ao cliente.

O custo com o setor de transporte na indústria de petróleo representa cerca de 30% do custo total da indústria; em grandes empresas petrolíferas, chega a ordem de bilhões de

dólares. Por essa razão, a importância do estudo logístico para este setor industrial é crucial, sendo de mesma magnitude em relação ao estudo da exploração e produção do petróleo e seus derivados.

Não foi encontrado na literatura nenhum trabalho que retrate um modelo matemático para distribuição de petróleo das plataformas marítimas, com finalidade de reduzir o custo total da operação de transporte. Desta forma, o presente trabalho tem como principal contribuição propor um modelo matemático para minimizar o custo total de operação de transporte de petróleo proveniente de várias plataformas marítimas, distribuído para vários pontos coletores e refinarias. É um trabalho pioneiro na elaboração e execução, assim como na comparação de métodos matemáticos para a solução do problema abordado.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Petróleo**

O grande marco histórico da civilização moderna para o petróleo iniciou-se no século XIX, em 1859, quando nos Estados Unidos foi perfurado o primeiro poço, com aproximadamente 20 m de profundidade, através de um sistema de percussão a vapor que produzia 2 m<sup>3</sup>/dia de óleo. Essa descoberta viabilizou a utilização do petróleo como um bem nas diversas áreas da economia, por exemplo, na iluminação pública e como combustível para motores a diesel e gasolina (CARDOSO, 2005).

O rápido desenvolvimento e aprimoramento de novas técnicas exploratórias surgiram naturalmente com a revolução industrial. As perfurações e investimentos se multiplicaram e o petróleo conseguiu a supremacia no cenário energético mundial (WALISIEWICZ, 2008).

Atualmente, o petróleo é a maior fonte energética presente no mundo, e vem sendo de primordial importância no simples uso como combustível e iluminação, até os diversos ramos e utilizações que se enquadra nos dias de hoje.

Conforme BRAGA (2005), o petróleo é um líquido formado basicamente por hidrocarbonetos e em menor proporção, oxigênio, enxofre e nitrogênio. O petróleo e o gás estão geralmente confinados em grandes profundidades, tanto abaixo dos continentes como dos mares. Em geral, o petróleo está disperso em cavidades e em fraturas de formações rochosas. O petróleo mais valioso, conhecido como leve, contém poucas impurezas de enxofre e grandes quantidades de compostos orgânicos facilmente refináveis em gasolina. O petróleo menos valioso é chamado de pesado e possui muitas impurezas e exige maiores recursos de refino para obtenção de seus derivados mais valiosos.

Segundo PRESS (2006), o petróleo e o gás formam-se em locais onde a produção de matéria orgânica é maior que o total que é destruído por bactérias e por decaimento. Essa condição existe em ambientes onde a produção de matéria orgânica é alta – tais como aqueles das costas marítimas, onde grande quantidade de organismos se reproduz e onde o suprimento de oxigênio é inadequado para compor toda a matéria orgânica. Muitas bacias de costa afora, nas margens continentais, satisfazem essas duas condições. Em tais ambientes, e em menor grau, em deltas fluviais e mares interiores, a taxa de sedimentação é alta, e a matéria orgânica é soterrada e protegida da decomposição.

Ainda conforme PRESS (2006), durante milhões de anos de soterramento, as reações químicas desencadeadas pelas temperaturas elevadas em profundidade lentamente transformaram parte do material orgânico em compostos de hidrogênio e carbono (hidrocarbonetos) líquidos e gasosos. Os hidrocarbonetos são os materiais combustíveis do petróleo e do gás natural. A compactação dos sedimentos orgânicos lamosos, que são as fontes de hidrocarbonetos, força os fluidos e os gases que os contêm a se deslocarem para as camadas de rochas permeáveis (como arenitos ou calcários porosos), que são denominados de reservatórios de petróleo. A baixa densidade desses bens energéticos faz com que eles ascendam até as partes mais altas que possam alcançar, onde, então, flutuam no topo da água que quase sempre ocupa os poros das formações permeáveis.

O petróleo raramente é produzido na forma de um fluido homogêneo, ocorrendo ao longo da vida do campo petrolífero a produção simultânea de óleo, gás, água e contaminantes. Em geral, esses campos petrolíferos são constituídos por plantas de processamento primário, que são equipadas por instrumentos e sistemas que visam promover a separação dos componentes desejados (BRASIL, 2011).

A descoberta de uma jazida de petróleo em uma nova área é uma tarefa que envolve um longo e dispendioso estudo e análise de dados geofísicos e geológicos das bacias sedimentares. Somente após exaustivo prognóstico do comportamento das diversas camadas do subsolo, os geólogos e geofísicos decidem propor a perfuração de um poço, que é a etapa que mais investimentos exige em todo o processo de prospecção.

Um programa de prospecção visa fundamentalmente dois objetivos: (i) localizar dentro de uma bacia sedimentar as situações geológicas que tenham condição para acumular petróleo; e (ii) verificar qual, dentre estas situações, possui mais chance de conter petróleo. Não se pode prever, portanto, onde existe petróleo, e sim os locais mais favoráveis para sua ocorrência.

A perfuração de um poço de petróleo é realizada através de uma sonda. Na perfuração rotativa, as rochas são perfuradas pela ação da rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração, a qual consiste basicamente de comandos (tubos de paredes finas). Os fragmentos da rocha são removidos continuamente através de um fluido de perfuração ou lama. O fluido é injetado por bombas para o interior da coluna de perfuração através da cabeça de injeção, e retorna à superfície através do

espaço anular formado pelas paredes do poço e a coluna. Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada do poço e uma coluna de revestimento de aço, de diâmetro inferior ao da broca, é descida no poço. O anular entre os tubos do revestimento e as paredes do poço é cimentado com a finalidade de isolar as rochas atravessadas, permitindo então o avanço da perfuração com segurança. Após a operação de cimentação, a coluna de perfuração é novamente descida no poço, tendo na sua extremidade uma nova broca de diâmetro menor do que a do revestimento para o prosseguimento da perfuração. Do exposto, percebe-se que um poço é perfurado em diversas fases, caracterizadas pelos diferentes diâmetros das brocas (THOMAS, 2004).

Para CARDOSO (2008), a facilidade com que o petróleo alcança a superfície está diretamente relacionada com a pressão existente no reservatório. Quando esta pressão é naturalmente suficiente, os fluidos contidos no reservatório chegam facilmente à superfície, ao que chamamos de elevação natural.

Os poços que produzem por elevação natural são chamados poços surgentes, os quais, ao longo de sua vida produtiva, acabam por ter um declínio na pressão preexistente, o que dificulta a produção econômica do reservatório. Nestes casos, seja no início ou ao longo de sua vida produtiva, a pressão do reservatório não é suficiente para o petróleo surgir, sendo necessária a utilização de métodos de elevação artificial para que possa produzir. Tais métodos consistem na utilização de equipamentos que visam aumentar o diferencial de pressão sobre o reservatório, aumentando sua vazão.

O principal objetivo do processamento primário de petróleo é de separar o gás, sob condições controladas, e remover a água e impurezas, para que o óleo permaneça estável e possa ser transferido para a unidade de refino. Dependendo do tipo de fluidos produzidos num campo petrolífero e da viabilidade técnico-econômica, a planta de processamento primário pode ter um grau de complexidade variável. As mais simples realizam apenas a separação gás/óleo/água, enquanto que as complexas incluem o condicionamento e compressão do gás, tratamento e estabilização do óleo, e o tratamento da água para descarte (THOMAS, 2004).

No Brasil as primeiras notícias da exploração diretamente ligadas ao petróleo foram relatadas entre 1892 e 1896, no município de Bofete – São Paulo, onde foi perfurado um poço com profundidade de aproximadamente 500 m, não sendo bem sucedido do ponto de

vista comercial, pois a produção foi de apenas 2 barris de petróleo. A presença de petróleo no país pode ser evidenciada somente em 1939 no município de Lobato – Bahia, onde foi perfurado um poço com uma sonda rotativa (FARIAS, 2008).

De acordo FARIAS (2008) e THOMAS (2004), em 1953, o monopólio estatal do petróleo foi instituído com a criação da Petrobras pela Lei Nº 2.004. Desde a criação da Petrobras já foi descoberto petróleo nos estados do Amazonas, Pará, Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte, Alagoas, Sergipe, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Paraná, São Paulo e Santa Catarina.

Segundo os mesmos autores, na década de 70 ocorreu a descoberta da província petrolífera da Bacia de Campos, que concentra gigantes campos petrolíferos, no Rio de Janeiro através do Campo de Garoupa.

Conforme POPP (2010), as reservas brasileiras de petróleo são estimadas em 5 bilhões de barris, que adicionadas às reservas estimadas em águas mais profundas do pré-sal (entre 6 e 8 bilhões) podem chegar a 12,2 bilhões de barris. Com estas projeções, o Brasil ficaria entre os países que possuem as maiores reservas de petróleo do mundo.

### **3.1.1. Propriedades**

#### **Densidade**

Propriedade de fácil determinação, que se constitui no primeiro indicativo do potencial de produção de frações de alto valor agregado. Diversos métodos podem ser utilizados na determinação da densidade, entre os quais se destacam o densímetro API e o densímetro digital (Norma ISO 12185). O densímetro API é uma alternativa para apresentação da densidade de uma faixa ampliada de valores. O resultado da determinação é o grau API, onde  $d$  representa a densidade do óleo, definido pela Equação (1) (BRASIL et al.; 2011).

$$API = \frac{141,5}{d \cdot 15,6/15,6} - 131,5 \quad (1)$$

A densidade é um excelente indicador do teor de frações leves do petróleo, A classificação de óleos crus segundo o grau API é apresentada na Tabela 1

Tabela 1 – Classificação de petróleos pela densidade (BRASIL et. al. 2011).

Densidade	Classificação
API > 40	Extraleve
40 > API > 27	Leve
33 > API > 27	Médio
27 > API > 15	Pesado
19 > API > 16	Extrapesado
API < 15	Asfáltico

### Pressão de Vapor Reid (PVR)

É a pressão que resulta da formação das fases vapor e líquido em equilíbrio devido ao aquecimento da substância à temperatura de 37,8°C, sendo determinada pelo método ASTM D323. Essa propriedade indica a presença relativa de frações leves, que refletem questões relacionadas à emissões de hidrocarbonetos para a atmosfera e à segurança no manuseio e estocagem do produto (BRASIL et al, 2011).

### Ponto de Fluidez

Determinado pelo método ASTM D5950, é definido como a menor temperatura na qual uma substância ainda flui, logo, trata-se de um indicativo da parafinidade do petróleo ou da fração. Normalmente, maiores teores de hidrocarbonetos parafínicos levam a maiores valores do ponto de fluidez. A determinação dessa propriedade é importante na definição condições de temperatura no armazenamento do petróleo e na transferência em oleodutos (BRASIL et al, 2011). Pode-se classificar o óleo cru quanto ao ponto de fluidez em:

- Alto ponto de fluidez (APF): petróleos com ponto de fluidez superior à temperatura ambiente.
- Baixo ponto de fluidez (BPF): petróleos com ponto de fluidez inferior a temperatura ambiente.

## **Viscosidade**

Representa a resistência ao escoamento de uma substância. Assim, trata-se de uma propriedade que influencia no transporte do petróleo, além de ser muito utilizada na estimativa de propriedades e em cálculos de engenharia.

### **3.2. Transporte Marítimo**

Para SARACENI (2006), a principal vantagem do modal marítimo é a sua capacidade individual (maior que qualquer outro modal) de transporte, em grandes quantidades, quaisquer cargas, sólidas ou líquidas, sejam essas embaladas, unitizadas ou a granel, o que proporciona elevada economia de escala quando são cobertas grandes distâncias. Isso se deve ao fato de a indústria naval ter desenvolvido navios especializados para o transporte de cada tipo de carga, otimizando sua operação na cadeia logística. Além disso, o modal apresenta alta eficiência energética.

Considerando-se as frotas dos diversos tipos de navios cargueiros, pode-se dizer que o modal apresenta não somente inigualável capacidade individual de transporte, mas também, no agregado de suas diversas frotas, a maior capacidade total entre todos os modais existentes.

Entretanto, a utilização do modal marítimo pressupõe a existência (ou a construção) de dispendiosos portos e/ou terminais especializados. Outra desvantagem, essa existente no transporte de carga geral e embalada, mas irrelevante na movimentação de granéis líquidos, é a lentidão do serviço e sua submissão a um grande número de manuseios, o que eleva o risco de perdas, avarias e contaminação da carga.

Um trabalho que aborda o problema de otimização de transporte marítimo foi apresentado por MARIELLE e KJETIL (2002), onde o problema de transporte de navios por cabotagem foi modelado como um problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), com o objetivo de se estabelecer a melhor rota para cada navio em uma dada frota. No artigo apresentam-se diferentes operações de transporte como: industrial, mercante, etc., e apresenta uma futura perspectiva de otimização para o problema de transporte baseado em decisões de suporte para a programação de rota de navios.

SPERANZA (1992) minimizou o custo total de operação de um problema de transporte via navegação marítima, cujos produtos são transportados através de uma única rota.. Neste



modelo, o custo total de transporte é proporcional ao número de viagens executadas, e é minimizado para todos os produtos de todos os navios. Baseado nisso, o autor apresenta um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), no qual foram simuladas quatro situações diferentes, e em seguida avaliado os resultados de cada situação. Assim, concluiu-se que, para cada caso vai mudar a frequência na qual vai ser transportado os produtos em uma dada rota, portanto vai mudar também o custo total da operação para cada situação.

FAGUERHOLT (2000) apresentou um modelo para o problema de roteamento de navios onde a função objetivo está associada no aumento dos custos gerais do transporte e ao agendamento (*scheduling*). O autor divide a metodologia em duas partes, sendo inicialmente geradas as rotas e, posteriormente, em uma segunda etapa, utilizadas como um dado de entrada no modelo.

FAGERHOLT (2001) considerou um problema real de *scheduling* com uma frota heterogênea de navios para carga e descarga. Um conceito preliminar de janela de tempo *soft* foi introduzido, objetivando flexibilidade no cumprimento das janelas de tempo convencionais. Normalmente, para a resolução destes problemas é gerado um grande número de soluções candidatas. Nesse trabalho foram aplicadas regras heurísticas para reduzir o número de soluções possíveis, além de técnicas de particionamento. Através desse modelo, foi possível obter melhores *schedules* e reduções no custo de transporte.

ONO (2001) em sua dissertação de mestrado apresentou um modelo para o problema de transporte de navios por cabotagem. No trabalho foram avaliadas as condições para a viabilidade do transporte marítimo e apontados os principais entraves e reformas necessárias no setor portuário. A metodologia empregada foi dividida em duas etapas. A primeira consistiu na geração de todos os roteiros viáveis, juntamente com os parâmetros relativos a cada uma das rotas, para cada classe de embarcação; a segunda etapa consistiu em um modelo de Programação Linear (PL) que minimizasse o custo total da operação de cabotagem. Este modelo apresentou o dimensionamento da frota por classe de embarcação, a rota para cada embarcação da frota e a frequência de atendimento ou escala em cada porto.

Atualmente, os navios petroleiros têm capacidade para transportar mais de 500.000 toneladas, como é o caso dos chamados *Ultra-LargeCrude Carrier* (ULCC) (INTERTANKO, 2008).

Até 1950, a distribuição de petróleo no Brasil era quase que integralmente feito por navios estrangeiros (NEIVA, 1986). Em 13 de março de 1949, entrou em vigor a Lei nº 650 que abriu crédito para compra de petroleiros, totalizando 180.000 toneladas. Com a aquisição do navio Presidente Dutra (16.200 toneladas), tem-se a inserção do Brasil no transporte marítimo de óleo.

No segundo semestre de 1973, as previsões demonstravam claramente um crescimento da frota de petroleiros reforçado pelas importações americanas. No entanto, ocorreu uma repentina inversão devido à queda no consumo de petróleo e à localização de novos produtores próximos aos países consumidores. A situação gradualmente gerou um excedente de petroleiros cujo pico ocorreu em 1978 com um total de 140.000.000 toneladas fora de serviço. Com a segunda crise do petróleo a situação melhorou um pouco, reduzindo para 120.000.000 toneladas fora de serviço (MASSERON, 1990).

Embora houvesse um fortalecimento do crescimento da frota de navios de grande porte, beneficiado pelo declínio da produção dos países não integrantes da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) e da volta do Oriente Médio como principal área de suprimento de petróleo, o uso de petroleiros de menor porte até foi sustentado por três fatores: primeiro, pelo aumento do comércio de produtos finais; segundo, pela nova capacidade de produção localizada em áreas mais próximas aos mercados consumidores; e terceiro, pelo fato destes petroleiros serem capazes de ancorar em um grande número de portos convencionais, incrementando o potencial para atendimento da alta demanda dos países em desenvolvimento. A Figura 1 mostra o crescimento desde a década de 80 dos navios petroleiros.

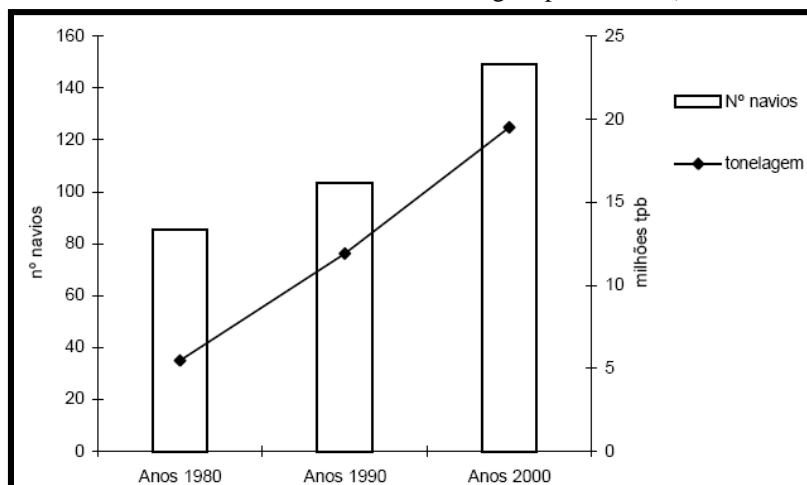
No Brasil, em 25 de abril de 1950, pelo Decreto nº 28.050, foi criada a Frota Nacional de Petroleiros (Fronape). Em 19 de junho do mesmo ano, a Fronape guarneceu o seu primeiro petroleiro de bandeira sueca rebatizado com o nome Presidente Dutra.

Em 3 de outubro de 1953, Getúlio Vargas, então presidente da República, assinou a Lei nº 2.004, criando a Petrobras. Seis meses após a promulgação do decreto, a Fronape foi desligada do Conselho Nacional de Petróleo, passando a constituir uma unidade da Petrobras (NEIVA, 1986).

Quando a Petrobras foi criada, a frota era formada por 22 navios, com o total de 224 mil toneladas. Três fatores decisivos levaram a Companhia a ampliar o número de petroleiros:

(i) aumento da produção do óleo bruto no Recôncavo Baiano e das refinarias nacionais; (ii) a necessidade de assegurar o transporte marítimo de petróleo adquirido no exterior; (iii) e a substancial economia de divisas que representa para um país uma frota especializada, liberando progressivamente o pagamento de fretes.

**Figura 1.** Média do número de navios e da tonelage por década (UNCTAD; 2003)



Em 1973, começou a navegar o primeiro grande petroleiro da Fronape, o *VeryLargeCrudeoil Carrier* (VLCC) José Bonifácio. Posteriormente foram adquiridos outros seis: Vidal Negreiros, Cairu, Henrique Dias, Felipe Camarão, José do Patrocínio e Barão de Mauá (FRONAPE, 2006).

Em atendimento a Lei nº 9.478 de 1997 surge a Transpetro, subsidiária da Petrobrás, com a incumbência de operar e construir dutos, terminais marítimos e embarcações para transporte de óleo e gás natural. A Fronape passou a ser a unidade de transporte marítimo da Transpetro. A transferência da frota de navios iniciou em 2001, sendo concluída em 2002 (Transpetro, 2009).

A Fronape é a maior transportadora de petróleo do hemisfério Sul e uma das maiores do mundo (Transpetro, 2009). A frota atual conta com 51 navios, conforme mostrado no Anexo 1.

A Petrobras desenvolveu uma sistemática de transporte para atender às suas necessidades, implementando sistemas de dutos, sistemas de armazenamento e a frota de navios para navegação de cabotagem e longo curso.

Em 2004, a quantidade total de cargas transportadas por via aquaviária foi de 529.005.051 toneladas. No mesmo ano, a quantidade de graneis líquidos (163.135.324 toneladas) foi correspondente a 30,8% do total de cargas. Acompanhando os índices desde 1998 até o ano 2004, a representação dos graneis líquidos no total de cargas transportadas, gira em torno de 32,3% (ANTAQ, 2008).

Uma considerável parte do percentual atribuído ao modal aquaviário deve-se ao escoamento da produção de petróleo da Bacia de Campos, que em 2004 foi de 438.292 mil barris (ANP, 2005); sendo cerca de 80% escoada pelos navios aliviadores (BRASIL ENERGIA, 2004).

Apesar da movimentação de petróleo e derivados nos portos ao longo da costa, a maior movimentação é registrada nos terminais que constituem o principal ponto de ligação dos navios com o continente, sendo os terminais aquaviários os que apresentam a maior capacidade de armazenamento e o maior número de tanques, correspondendo a 65,9% e 71,3% do total, respectivamente.

O transporte marítimo de petróleo e derivados pode ser efetuado através da navegação, utilizando-se para tal, navios tanque conhecidos como petroleiros, ou através de dutos submarinos instalados no leito marinho. Em ambos os casos, a ligação destes modais com a terra se dá através dos portos e terminais marítimos localizados nas áreas costeiras, estando nestes últimos concentrada a maior movimentação de petróleo e derivados.

Transporte de óleo é realizado por navios fretados que transportam cerca de 140 milhões de toneladas por ano. Alguns navios são contratados para realizar apenas uma viagem, enquanto que outros são alugados, em geral por um ano, para realizar o número de viagens que o contratante desejar. Não há uma frota fixa de navios fretados e, além disso, estes navios não atuam em uma rota específica, embora alguns atuem em determinada região devido à característica da carga, (ALCOFORADO, 2003).

O Programa de Modernização e Expansão da Frota (Promef) revitalizou a indústria naval brasileira. Lançado em 2004, o Promef faz parte do Plano de Aceleração de Crescimento (PAC) do Governo Federal. O Promef prevê a construção de 49 navios, num total de 4 milhões de ton de porte bruto. Já foram contratadas 33 embarcações, sendo que seis delas já foram lançadas ao mar no ano de 2010.

### 3.3. Logística do Transporte

A logística teve seu surgimento nas civilizações primitivas com a necessidade de melhorar as condições de vida e o acesso aos alimentos e a água. Nas guerras, o importante era criar formas e estratégias que facilitasse o deslocamento de armas, munições, mantimentos, alimentos entre outros. Com isso, multiplicaram-se as formas e a importância de se utilizar a logística. Hoje, seu uso não se resume somente nisso, indo muito além do simples transporte de materiais de um meio a outro.

Na sua origem, o conceito de Logística estava essencialmente ligado às operações militares. Ao decidir avançar suas tropas seguindo uma determinada estratégia militar, os generais precisavam ter, sob suas ordens, uma equipe que providenciasse o deslocamento, na hora certa, de munição, víveres, equipamentos e socorro médico para o campo de batalha. Por se tratar de um serviço de apoio, sem o *glamour* da estratégia bélica e sem o prestígio das batalhas ganhas, os grupos logísticos militares trabalhavam em silêncio, na retaguarda (NOVAES, 2007).

Um dos objetivos mais importantes da logística é conseguir criar mecanismos para entregar os produtos ao destino final num tempo mais curto possível, reduzindo os custos. Para isso, os especialistas em logística estudam rotas de circulação, meios de transportes, locais de armazenagem (depósitos) entre outros fatores que influenciam na área.

Para CHRISTOPHER (1997), a logística é definida como o processo de gerenciar estrategicamente a aquisição, movimentação e armazenagem de materiais, peças e produtos acabados (e os fluxos de informações correlatas), através de organização e de seus canais de marketing, de modo a poder maximizar a lucratividade presente e futura, através do atendimento dos pedidos a baixo custo.

SILVA (1996) apresenta uma visão geral sobre o transporte de petróleo e derivados, onde seu trabalho leva em conta os aspectos econômicos do transporte do petróleo no Brasil e no mundo, mostra que a importância do transporte marítimo está ligado com o transporte ferroviário e rodoviário. Os riscos de acidentes juntamente com impactos ambientais que podem ocorrer em um acidente de um petroleiro ou em dutos de transporte, também são analisado nos artigos.

A depender do conjunto que integra as atividades que compõem a cadeia logística de uma indústria, o planejamento pode se tornar extremamente complexo. Normalmente

realizado num nível agregado, utiliza-se modelos de pesquisa operacional, a fim de se encontrar soluções otimizadas para o empreendimento. Entretanto, quando este planejamento integrado é repassado às partes que constituem a empresa, ele gera incertezas sobre a solução a ser adotada, já que novas restrições, que inviabilizem a adoção da solução integrada pelas partes, podem surgir.

Estudo realizado por DORING (1998) propõe um pensamento bastante direto sobre a problemática do transporte, considerando que o problema logístico é proporcionar os meios e os recursos de toda a natureza necessários à aplicação do poder da empresa, em operações comerciais específicas, ou nas de caráter contínuo, enfim, nas operações de negócios.

O planejamento operacional de organizações produtivas deve determinar onde, como, quanto e quando produzir. Considera-se que, com a capacidade de produção limitada e geograficamente dispersa (como é o caso da indústria do petróleo), fornecer mercadorias certas no instante e local necessários para a manufatura é crítico, e, portanto, a programação do fluxo de materiais, é uma das principais decisões neste nível de planejamento. (BALLOU, 1995).

HARTMANN (1999) descreve os diferentes níveis de planejamento, faz questão de separar o planejamento operacional das operações, da programação destas operações, diferenciando estes níveis de planejamento, em função dos seus objetivos e das questões que cada um pretende.

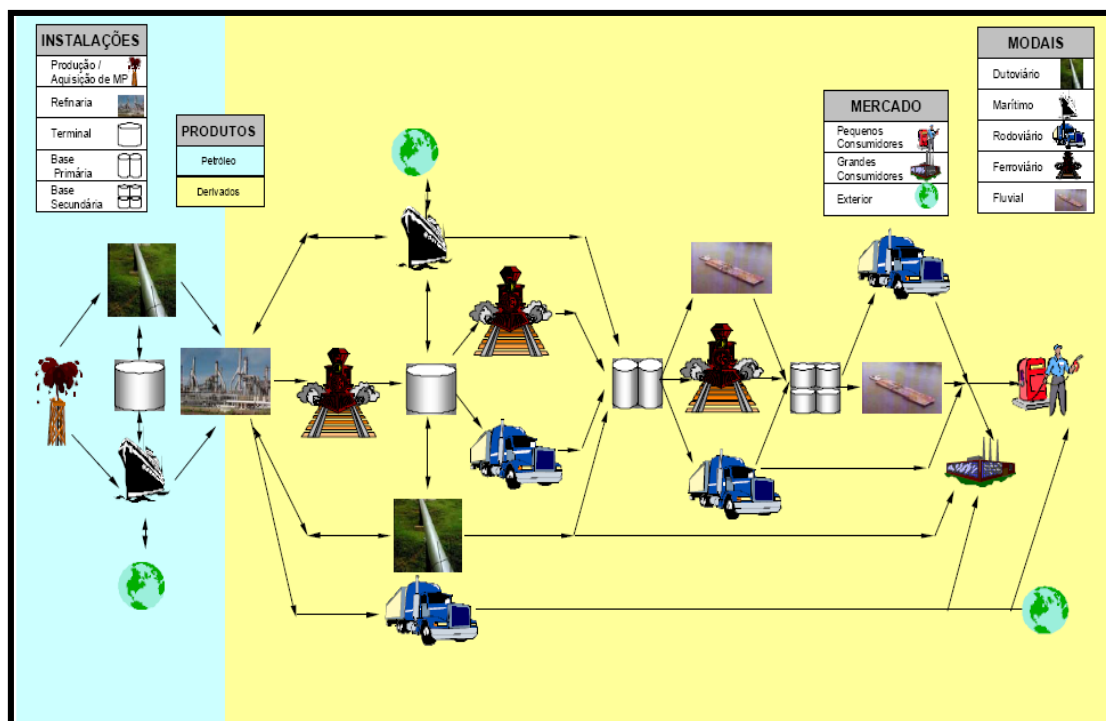
O perfil da indústria do petróleo, na qual as fontes de petróleo estão geralmente muito distantes dos centros de consumo, muitas vezes em outro continente, restringe a possibilidade de transporte à utilização de dois modais capazes de interligar continentes: marítimo e aéreo.

A logística de transporte marítimo está diretamente relacionada com o problema de escoamento de petróleo. A literatura apresenta poucos estudos sobre logística de transporte marítimo e, especificamente sobre o escoamento de petróleo, constata-se uma tendência de crescimento deste modal (RIBEIRO, 2000), principalmente na navegação de cabotagem devido à concentração da atividade econômica na região costeira. No entanto, segundo o mesmo autor, atualmente a constatação deste modal nas estatísticas refere-se ao transporte de petróleo e derivados ao longo da costa, representando cerca de 80% do total de cargas transportadas por este modal.

Claramente, a determinação das quantidades, qualidades e prazos de fornecimento de matéria primas, a programação das operações diárias das refinarias e da distribuição dos produtos fazem parte do processo de planejamento das operações logísticas. Consequentemente, a aquisição de matéria prima, o processamento nas refinarias, a distribuição e comercialização dos produtos estão diretamente relacionadas com este planejamento.

Determinados as matérias primas e os mercados das refinarias, estas detalham as cargas a serem processadas em cada uma das suas unidades. De posse dessas informações, o departamento logístico programa a transferência e a distribuição das matérias primas e produtos entre as refinarias e os mercados. A Figura 2 reproduz estes fluxos.

**Figura 2. Fluxos Logísticos na Indústria do Petróleo (bp.blogspot.com, acessado 03/2012)**



Segundo OLIVEIRA (1993), o transporte de hidrocarbonetos no país vincula-se a três funções: o escoamento da produção dos campos de exploração para instalações de armazenamento e de processamento, a importação e exportação de petróleo bruto e derivados e a distribuição dos produtos processados. Para que tais objetivos sejam atendidos, torna-se imprescindível a combinação de meios de transporte e instalações. Tem-

se, então, a integração de dutos, terminais e navios petroleiros e, de forma complementar os transportes ferroviários e rodoviários.

### **3.4. Refinarias**

Após a extração do poço e do primeiro processo de separação, o petróleo é encaminhado para uma refinaria onde será fracionado em vários produtos, e industrializado.

Cada refinaria é composta por setores de tratamento do óleo e será responsável pela separação ou fracionamento das fases, como gasolina, querosene e óleo diesel, entre outros. Contudo, assim como há petróleos com características diferentes, nem toda refinaria conseguirá processar as mesmas proporções das fases.

As principais empresas de petróleo buscam refinar o petróleo perto dos centros de consumo, de forma a reduzir os custos relativos de transporte e garantir a disponibilidade dos produtos nos principais centros consumidores. Dentro da lógica da integração vertical, o negócio refino é visto como parte do negócio petrolífero, sem que normalmente as empresas busquem uma margem de retorno específica para este segmento da cadeia.

O petróleo não é uma substância pura e sim uma complexa mistura de compostos orgânicos e inorgânicos em que predominam os hidrocarbonetos. Ele por si só tem pouquíssimas aplicações práticas, servindo quase que tão somente como óleo combustível. Para que ele tenha seu potencial energético plenamente aproveitado, bem como sua utilização como fonte de matérias-primas, é importante que seja realizado seu desmembramento em cortes, com padrões pré-estabelecidos para determinados objetivos, denominado de frações (ABADIE, 2002).

Segundo MARIANO (2005), refinarias de petróleo são um complexo sistema de operações múltiplas; as operações que são usadas em uma dada refinaria dependem das propriedades do petróleo que será refinado, assim como dos produtos desejados. Por essas razões, as refinarias podem ser muito diferentes.

Conforme o site da ANP (2013), uma unidade industrial que utiliza como matéria-prima o petróleo vindo de unidade de extração e produção de um campo, e que através de processos que incluem aquecimento, fracionamento, pressão, vácuo e reaquecimento na presença de catalisadores, gera derivados de petróleo desde os mais leves (gás de refinaria, GLP, nafta) até os mais pesados (bunker, óleo combustível), além de frações sólidas tais como coque e resíduo asfáltico.

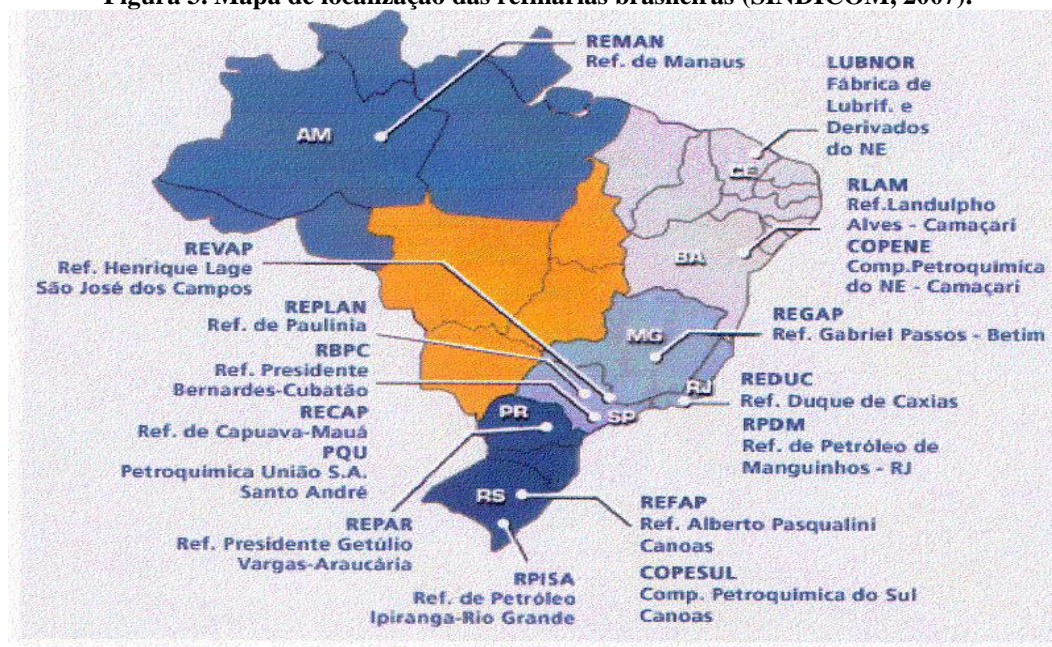


Nos últimos anos verificou-se a ampliação da capacidade das unidades de processamento, principalmente as de destilação atmosférica e de craqueamento catalítico fluido, devido a folgas nos processos e a construção de novas unidades, principalmente unidades de HDT (hidrotratamento) e coqueamento retardado, visando, principalmente, à melhoria na qualidade dos derivados.

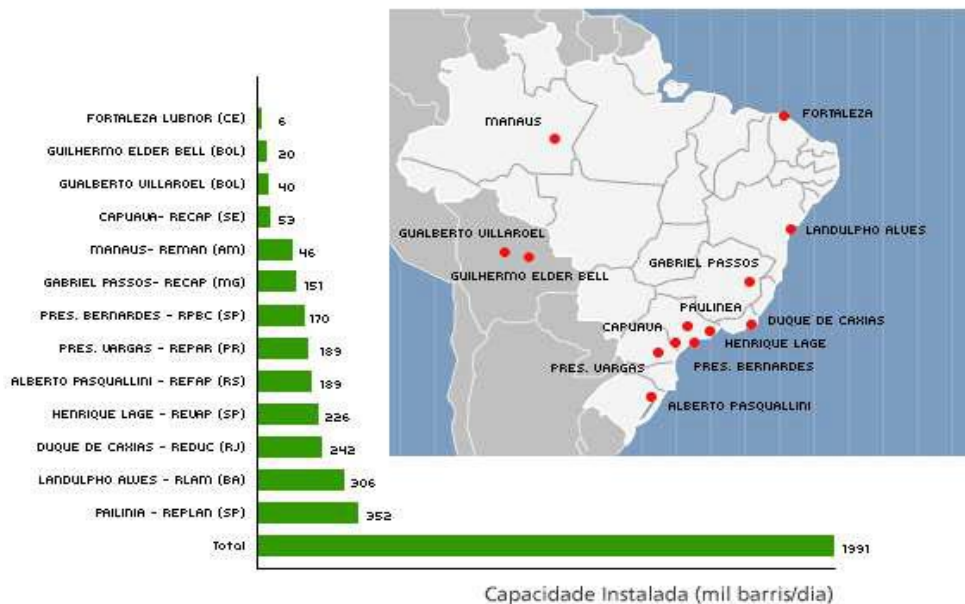
Das 14 refinarias existentes no país, 12 pertencem à Petrobras e duas à iniciativa privada: a pioneira Ipiranga, no Sul (do Grupo Ipiranga) e a de Manguinhos no Rio de Janeiro (do consórcio formado pela Repsol e pela Yacimientos Petrolíferos Fiscales - YPF, da Argentina) (ANP, 2014).

A Figura 3 mostra localização das refinarias no território nacional, já a Figura 4 mostra a capacidade de refino das refinarias em barris por dia. A refinaria Abreu e Lima localizada em Pernambuco, que foi inaugurada no dia 06 de dezembro de 2014, ainda não teve dados operacionais divulgado até o momento, sua capacidade de refino no projeto é 2,5 milhões de barris por mês, onde vai incrementar a produção de petróleo nacional.

**Figura 3. Mapa de localização das refinarias brasileiras (SINDICOM, 2007).**



**Figura 4. Capacidade das refinarias brasileiras (SINDICOM, 2007).**



### 3.5. Pesquisa Operacional

A Pesquisa Operacional é uma ciência aplicada, voltada para a resolução de problemas reais. Tendo como foco a tomada de decisões, aplica conceitos e métodos de outras áreas científicas para concepção, planejamento ou operação de sistemas para atingir seus objetivos. Através de desenvolvimentos de base quantitativa, a Pesquisa Operacional visa também introduzir elementos de objetividade e racionalidade nos processos de tomada de decisão, sem descuidar, no entanto, dos elementos subjetivos e do enquadramento organizacional que caracterizam os problemas (<http://www.sobrapo.org.br/sitesobrapo.htm>).

Durante a Segunda Guerra Mundial, um grupo de cientistas foi convocado na Inglaterra para estudar problemas de estratégia e de tática associados com a defesa do país. O objetivo era decidir sobre a utilização mais eficaz de recursos militares limitados. A convocação deste grupo marcou a primeira atividade formal de Pesquisa Operacional. Os resultados positivos conseguidos pela equipe de pesquisa operacional inglesa motivaram os Estados Unidos a iniciarem atividades semelhantes. Apesar de ser creditada à Inglaterra a origem da Pesquisa Operacional, sua propagação deve-se principalmente à equipe de cientistas liderada por George B. Dantzig, dos Estados Unidos, convocada durante a Segunda Guerra

Mundial. Ao resultado deste esforço de pesquisa, concluído em 1947, deu-se o nome de Método Simplex.

Com o fim da guerra, a utilização de técnicas de pesquisa operacional atraiu o interesse de diversas outras áreas. A natureza dos problemas encontrados é bastante abrangente e complexa, exigindo portanto, uma abordagem que permita reconhecer os múltiplos aspectos envolvidos. Uma característica importante da pesquisa operacional é que facilita o processo de análise e de decisão é a utilização de modelos. Eles permitem a experimentação da solução proposta, isto significa que uma decisão pode ser mais bem avaliada e testada antes de ser efetivamente implementada (LISBOA,2002)

A Pesquisa Operacional tem causado impacto (positivo) crescente na administração de empresas nos anos recentes e, o número e a variedade de suas aplicações continuam a crescer rapidamente. Algumas de suas técnicas envolvem ideias sofisticadas em ciências políticas, matemática, economia, teoria da probabilidade e estatística. Também é amplamente usada em outros tipos de organizações, inclusive negócios e indústria.

Abaixo, alguns dos problemas que têm sido resolvidos por técnicas particulares de pesquisa operacional:

**PROGRAMAÇÃO LINEAR (PL)** – tem sido usada com sucesso na solução de problemas relativos à alocação de pessoal, mistura de materiais, distribuição, transporte, carteira de investimento e avaliação da eficiência;

**PROGRAMAÇÃO DINÂMICA** – tem sido aplicada com sucesso em áreas como planejamento de despesas de publicidade, distribuição do esforço de vendas e programação de produção;

**TEORIA DAS FILAS** – tem sido aplicada na solução de problemas relativos ao congestionamento de tráfego, máquinas de serviços sujeitas à quebra, determinação do nível de uma força de serviço, programação do tráfego aéreo, projetos de represas, programação de produção e operação de hospitais;

**PROGRAMAÇÃO INTEIRA** – é uma forma de programação linear onde as variáveis podem apenas apresentar números inteiros e tem sido utilizada na resolução de problemas de investimento, transporte e logística, dentre outros;

**PROGRAMAÇÃO MISTA** – é uma forma de programação linear onde as variáveis podem assumir valores binários, inteiros e contínuos, este modelo também é definido como

otimização combinatória, enquadrando-se em problemas de dificuldades não polinomiais *NP-HARD*;

PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR – modelo matemático onde a função objetivo, as restrições ou ambas, apresentam não linearidade em seus coeficientes.

PROGRAMAÇÃO MULTIOBJETIVO – é uma forma de programação linear e não linear onde se analisa múltiplas funções objetivos;

GOAL PROGRAMMING – é uma extensão dos modelos de programação multiobjetivo, contendo vários modelos específicos para cada problema de decisão;

BODINGTON (1995) apresenta estudos de casos com grandes companhias de petróleo que confeccionam seu planejamento operacional corporativo com o uso da PL e o planejamento operacional das refinarias com o uso da programação não linear, principalmente em função da modelagem da qualidade de produtos intermediários e finais.

KLINGMAN (1989) preocupou-se com a integração entre as diversas atividades da indústria e seus diferentes níveis de planejamento (do estratégico até a programação das atividades) e enfatiza que essa integração precisa estar refletida nos diversos sistemas e modelos utilizados nessas instâncias, situando o planejamento operacional e a PL dentro de um ciclo que vai do planejamento estratégico da companhia até a análise dos resultados obtidos.

Uma solução matemática para um problema da existência de uma capacidade superdimensionada no transporte marítimo com múltiplas origens e múltiplos destinos foi explorada por PAPADAKIS e PERAKIS (1989a). O modelo matemático proposto foi formulado via programação não-linear, sendo estabelecidas às condições de origem e destino, relacionadas a uma velocidade ótima.

PAPADAKIS e PERAKIS (1989b), dando continuidade ao trabalho anterior, apresentaram um modelo não linear multivariável para otimização de uma frota de navios que operam com diferentes velocidades, numa rota fixa entre dois portos. O dimensionamento da frota é baseado na velocidade, não considerando as janelas de tempo. A função objetivo visa minimizar a velocidade da embarcação sem prejuízo do atendimento.

SPERANZA e UKOVICH (1996) desenvolveram um modelo Programação Inteira Mista (PIM) que foi utilizado para a minimização do custo de transporte e investimento,

para o envio de diferentes tipos de produtos, via transporte naval, considerando uma origem e um destino. Mais tarde, o mesmo problema foi estudado, substituindo a PIM por algoritmos heurísticos considerando vários destinos.

TEIXEIRA (1995) aplica a simulação determinística na modelagem de um plano de produção de refinaria e faz referência à sua flexibilidade e facilidade para obter aderência da modelagem à realidade. O objetivo do seu trabalho foi trabalhar a interface com o usuário. Ela comenta que, com a simulação, o usuário percebe melhor a influência que os dados e variáveis exercem uns nos outros e no resultado – “o enfoque do modelo de simulação é físico e não matemático (como no caso da PL), o que leva o usuário a ter uma visão mais clara do problema”. Ela não deixa de ressaltar que a solução obtida, neste caso, não é ótima.

PUCU (2009) apresentou um estudo de distribuição de granéis líquido, através de vários portos do cenário brasileiro, tendo vários destinos e várias origens, formalizando um modelo matemático que pode minimizar o custo da operação de transporte e também atender as demandas de cada porto, mostrando uma excelente ferramenta para distribuição de granéis líquido através do transporte marítimo no cenário nacional.

PUCU e SOLETTI (2010) apresentaram um trabalho de distribuição de petróleo de um conjunto de plataformas marítimas, através de uma frota de navios, tendo uma plataforma de destino, formalizando um modelo matemático de programação linear inteira mista.

PUCU (2011) apresenta um trabalho de distribuição e estocagem de petróleo de um conjunto de plataformas marítimas, através de uma frota de navios, tendo uma plataforma de destino, utilizando diferentes métodos matemáticos, para resolução do problema de programação linear inteira mista, fazendo comparativos entre os métodos utilizados.

MURACT (2008) apresentou um problema de *scheduling* para um escoamento de petróleo bruto das plataformas marítimas, onde é realizado *scheduling* de atendimento ao centro consumidor, definindo-se e propondo-se uma metodologia para resolução do problema apresentado.

MÁS (1998), apresentou um trabalho, baseado nos estudos de Shah (1996), para o problema de *scheduling* de óleo cru, objetivando a otimização de transporte refinaria/porto, utilizando um oleoduto. O autor procura obter dados sobre o descarregamento dos

petroleiros, alocação dos crus nos tanques do porto e da refinaria, operação do oleoduto e unidades de destilação.

MENEZES (2000) apresenta um diagnóstico para a distribuição de combustíveis a partir do Terminal de Miramar, considerando dados obtidos sobre o recebimento, estocagem e expedição destes. A partir do diagnóstico, foi proposta uma nova metodologia de trabalhar com o objetivo de maximizar o lucro, em atendimento a situação diagnosticada. Levando em consideração as desregulamentações de setores da economia, no caso, o setor do petróleo, a informatização, os avanços nas telecomunicações e nas tecnologias em geral.

Outro problema da logística aplicada à plataforma marítima foi abordado por SIMÕES (2002), onde o autor analisa a implantação da Logística Reversa em uma unidade de negócios de exploração e produção de petróleo da Petrobras. Este trabalho estuda a logística de reservas aplicada às plataformas, tanto fixa como flutuante, dando ênfase à preservação ambiental e os riscos com a segurança.

Ao descrever essa complexidade, HARTMANN (1997) associa os fluxos envolvidos na indústria do petróleo a uma teia cheia de nós, onde cada nó representa a necessidade de uma tomada de decisão frente a um grande número de possibilidades e recomenda a aplicação da PL.

BODINGTON (1995) e EPPEN (1998) apresentaram estudos de casos com grandes companhias de petróleo que confeccionam seu planejamento operacional corporativo com o uso da PL e o planejamento operacional das refinarias com o uso da programação não linear, principalmente em função da modelagem da qualidade de produtos intermediários e finais.

### **3.6. Métodos Matemáticos para Otimização**

Um modelo de otimização consta de uma função-objetivo a ser maximizada ou minimizada, sujeita a restrições que caracterizam o problema e que restringem os possíveis valores que as variáveis envolvidas podem assumir. Existem diversas técnicas de solução que são utilizadas segundo o tipo de problema com que se está trabalhando. Essas técnicas são a Programação Linear (PL), a Programação Linear Inteira (PLI), a Programação Não Linear (PNL), a Programação Dinâmica, dentre outras. Entre os tipos de programação da pesquisa operacional que utilizamos para a resolução do problema proposto se destaca-se a

programação linear, programação com inteiros e métodos de grafos, explicando cada um deles um pouco mais detalhado a seguir.

### **3.6.1. Programação linear (PL)**

Um modelo de Programação Linear é um modelo matemático de otimização no qual todas as funções são lineares (tanto a função objetivo, quanto as restrições). Para que um modelo de um determinado sistema possa ser representado por meio de PL, ele deve possuir as seguintes características:

- Proporcionalidade – a quantidade de recurso consumido por uma dada atividade deve ser proporcional ao nível dessa atividade na solução final do problema. Além disso, o custo de cada atividade é proporcional ao nível de operação da atividade;
- Não Negatividade – deve ser sempre possível desenvolver dada atividade em qualquer nível não negativo e qualquer proporção de um dado recurso deve sempre poder ser utilizado;
- Aditividade – o custo total é a soma das parcelas associadas a cada atividade;
- Separabilidade – pode-se identificar de forma separada o custo (ou consumo de recursos) específico das operações de cada atividade.

Segundo Lisboa (2002), podemos definir a Programação Linear como sendo o planejamento de atividades para obter um resultado ótimo, isto é, um resultado que atenda, da melhor forma possível, a um determinado objetivo. Embora a alocação de recursos para atividades seja o tipo mais comum, a programação linear tem numerosos outros tipos de aplicação; assim, na prática, qualquer problema cujo modelo matemático se enquadre na forma geral de um modelo de PL, é um problema de Programação Linear. Um procedimento muito eficiente, chamado Método Simplex, está disponível para resolver problemas de PL, mesmo aqueles com milhares de variáveis. O objetivo da PL é encontrar o lucro máximo ou o custo mínimo em situações reais.

Em programação linear quando as restrições de um modelo são apresentadas na forma de inequações, diz-se que esse modelo está na Forma Canônica:

Minimize

$$Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \quad (2)$$

Sujeito à restrições:

$$A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + \dots + A_{1n}X_n \geq B_1 \quad (3)$$

$$A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + \dots + A_{2n}X_n \geq B_2 \quad (4)$$

...

$$A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + \dots + A_{2n}X_n \geq B_2 \quad (5)$$

Onde:

- Função a minimizar: função objetivo.
- Inequações: restrições.
- Conjunto de soluções que satisfazem as restrições: soluções admissíveis.
- Solução admissível que minimiza a função objetivo: solução ótima.
- Coeficientes  $C_j$ : coeficientes de custo.
- Coeficientes  $a_{ij}$ : coeficientes tecnológicos.
- Coeficientes  $b_i$ : termos independentes.

### 3.6.2. Problema de Transporte (REDES)

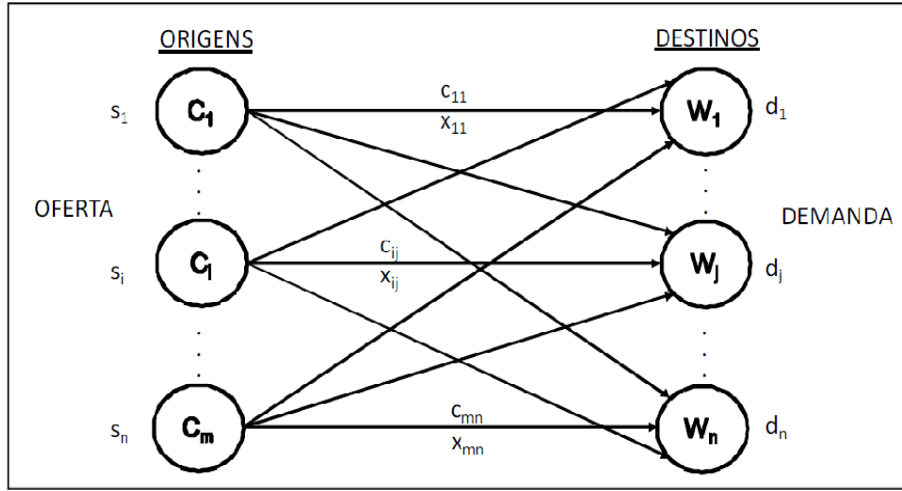
Segundo Lins et. Al. (2006), o Problema de Transporte é talvez o mais representativo dos problemas de Programação Linear. É um problema de grande aplicação prática, tendo sido estudado por vários investigadores, embora tenha sido Dantzig o primeiro a estabelecer a sua formulação em PL e a propor um método sistemático de resolução.

O problema geral de transporte consiste em determinar a forma mais eficiente, isto é, mais económica de enviar um bem disponível em quantidades limitadas em determinados locais para outros locais onde é necessário. Como qualquer problema de PL, este pode ser resolvido pelo método do simplex. Porém a sua estrutura particular permitiu a utilização de métodos que embora derivados do Simplex, são mais eficientes.

A Figura 5 ilustra o problema de transporte sob a forma de uma rede com  $m$  origens e  $n$  destinos representados por nós; os arcos que ligam as origens aos destinos representam os percursos através dos quais o produto pode ser transportado.



Figura 5. Grafos de transporte n origens e n destinos (LINS et. Al., 2006).



O modelo generalizado do problema é representado por:

$$\min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (6)$$

Sujeito a:

$$\min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = d_i \text{ (demanda)} \quad (8)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n) \quad (9)$$

### 3.6.3. Programação Inteira (PI)

A Programação Inteira pode ser entendida como um caso específico da Programação Linear. Se as variáveis do problema pertencerem ao conjunto dos números inteiros (ou ao menos, parte destas variáveis), temos uma subclasse da Programação Linear chamada Programação Inteira (PI) ou programação Linear Inteira.

Uma abordagem frequente ao problema PI consiste em resolver o problema PL associado, que resulta de relaxar as variáveis inteiras e depois arredondar as soluções não inteiras obtidas. No entanto, dificuldades podem surgir:

- Após arredondamento a solução podem ao ser admissível para o problema;
- Falta de garantia de que uma solução (conveniente) arredondada seja ótima para o problema. Aliás, pode estar bem longe do ótimo.

Portanto, seria útil termos um procedimento de solução eficaz para termos uma solução ótima para problemas de programação linear inteira. Problemas de Programação Inteira (conjunto solução discreto) são geralmente muito mais difíceis de serem resolvidos quando comparados aos Problemas de Programação Linear ordinários (conjunto solução contínuo).

### 3.7. Software GAMS (*General Algebraic Modeling System*)

O GAMS foi desenvolvido por MEERAUS e BROOKE para o Banco Mundial em 1980, e faz parte do grupo de programas onde existe uma junção de algoritmos de otimização. Possuem uma linguagem de alto nível para a formulação de modelos de pesquisa operacional, tornando-se uma ferramenta muito utilizada para este campo, suportando um grande número de algoritmos. Ele foi especialmente idealizado para a modelagem de problemas de programação linear, não linear, inteira e mista.

O GAMS permite a otimização através de diversos *solvers*, como, por exemplo, MINOS, ZOOM, DICOPT e CONOPT, CPLEX, BONMIN além de utilizar uma linguagem de alto nível para a representação compacta de modelos grandes e complexos, possibilitando que descrições do modelo sejam independentes dos algoritmos de solução, e que alterações sejam feitas nas especificações do modelo de maneira bastante simples.

O projeto do GAMS utilizou-se da programação matemática na maneira de descrever o problema e na infinidade de métodos de resolvê-lo, aliando-se a isso uma estrutura de trabalho para o desenvolvimento da organização geral e transformação de dados, incorporada da teoria dos bancos de dados relacionais (BROOKE et al., 1997).

O GAMS vem se tornando cada vez mais importante, visto que os problemas analisados estão se tornando cada vez mais complexos, e esse software propicia mais tempo para solucionar problemas referentes ao modelo, e não a implementação computacional.

As principais vantagens intrínsecas a utilização do GAMS são:

- Fornecer uma linguagem de alto nível para uma representação compacta de modelos extensos e complexos;

- Permitir mudanças na especificação dos modelos de forma simples e segura;
- Permitir relações algébricas enunciadas de forma não ambígua;
- Permitir descrições de modelos independentes dos algoritmos de solução;
- Simplificar a preparação de dados de entrada e relatórios de saída e transformar automaticamente os dados para a forma requerida pelos pacotes de programação matemática.

A seguir serão apresentados os *solvers* usados nesse trabalho.

### 3.7.1. Solver CPLEX

A sigla CPLEX é a combinação da letra C, em referência à linguagem de programação C utilizada no desenvolvimento deste algoritmo, com a terminação PLEX, em referência ao algoritmo *simplex* de solução de problemas de PL. Este *solver* foi desenvolvido pela *CPLEX Optimization Inc.*, empresa fundada em 1988 com a ideia de comercializar algoritmos de PL que pudessem ser utilizados para solucionar, de forma rápida, problemas grandes e difíceis de Programação Linear por meio do método *primal simplex*. Posteriormente, este algoritmo incorporou o suporte para utilizar o Método *Dual Simplex*; incorporou o algoritmo *Barrier*, que é uma alternativa ao Método *Simplex* para problemas de programação linear e programação quadrática; incorporou o algoritmo *Branch-and-Bound*, para solucionar problemas de Programação Inteira Mista Quadrática e Programação Inteira Mista com restrições quadráticas; incorporou heurísticas de pré-processamento de dados, para gerar boas soluções iniciais; e incorporou técnicas de programação por restrições, para melhorar o desempenho de busca.

O Método Simplex é um procedimento matricial para resolver o modelo de programação linear na forma normal. Começando com  $X_0$ , o método localiza sucessivamente outras soluções básicas viáveis acarretando melhores valores para a função objetivo até ser obtida a solução ótima. Para os problemas de minimização, o método simplex utiliza a Tabela 2.

**Tabela 2.** Resolução método Simplex

$X^T \ C^T$		
$X_0 \ C_0$	A	B
	$C^T - C_0^T A$	$-C_0^T B$

Para os problemas de maximização a tabela acima é aplicado desde que os elementos da linha inferior sejam colocados com sinal invertido. Uma vez obtida esta última linha da tabela, a segunda linha e a segunda coluna do Quadro, correspondentes a  $C^T$  e  $C_0$ , respectivamente e podem ser eliminadas. Definindo os vetores e matrizes tem-se que.

$C^T$ : vetor linha dos custos correspondentes.

X: é o vetor coluna de incógnitas (incluindo variáveis de folga, excesso e artificiais).

A: é a matriz de coeficientes das equações de restrições.

B: é o vetor coluna dos valores à direita das equações representando as restrições.

$X_0$ : é o vetor coluna de variáveis de folga e artificiais

$C_0$ : é o vetor coluna de custo associado com as variáveis em  $X_0$

Os passos abordados a seguir referem-se a um problema de programação linear para minimizar a função objetiva, o caso do problema da tese estudada.

Para iniciar o Método Simplex necessita-se de uma solução básica viável inicial (elemento do vetor  $X_0$ ), a qual é um dos pontos extremos. Este método verifica se a presente solução é ótima. Se esta não for é porque um dos demais pontos extremos adjacentes (vértice) fornecem valor menor para a função objetivo que a atual, quando o problema considerado é de minimização. Ele então faz uma mudança de vértice na direção que mais diminua a função objetivo e verifica se este novo vértice é ótimo.

O processo termina quando estando num ponto extremo, todos os outros pontos extremos adjacentes fornecem valores maiores para a função objetivo.

Portanto, a troca de vértice, faz uma variável não básica crescer (assumir valor positivo) ao mesmo tempo em que zera uma variável básica (para possibilitar a troca) conservando a factibilidade do Problema de Programação Linear.

Para isso, escolhemos uma variável, cujo custo relativo é mais negativo (não é regra geral) para entrar na base, e as trocas de vértices são feitas até que não exista mais nenhum custo relativo negativo.

A variável que sairá da base é aquela que ao se anular garante que as demais continuem maiores ou iguais a zero quando aumentamos o valor da variável que entra na base.

De forma resumida temos os seguintes passos para o método simplex:

- I) Achar uma solução factível básica inicial;
- II) Verificar se a solução atual é ótima. Se for, pare. Caso contrário, siga para o passo III).
- III) Determinar a variável não básica que deve entrar na base;
- IV) Determinar a variável básica que deve sair da base;
- V) Atualizar o sistema à fim de determinar a nova solução factível básica, e voltar ao passo II.

### **3.7.2. Solver BONMIN (Métodos de Pontos Inteiros)**

O solver BONMIN do GAMS oferece um Método Primal/Dual de pontos interiores. Os métodos de Pontos Interiores possuem uma abordagem diferente daquela do método Simplex para Programação Linear. A diferença fundamental entre os métodos passa na natureza das soluções. No Método Simplex, estas soluções pertencem ao contorno da região factível até atingir o ótimo.

Karmarkar (1984) o método de pontos interiores apresenta-se diferentemente do método simplex, uma vez que aqui é proibitivo caminhar pela fronteira do conjunto viável de um PPL (problema de programação linear). Os algoritmos de pontos interiores geram pontos interiores (pontos no primeiro ortante com coordenadas estritamente positivas) viáveis, ‘próximos à trajetória central’, até obter uma solução aproximadamente ótima. Estes algoritmos trabalham com a hipótese de que é dado um ponto interior viável inicial (‘próximo à trajetória central’).

Os algoritmos de pontos interiores que implementados neste trabalho são algoritmos primais-duais: passos curtos e preditor-corretor.

O trabalho de Silva (2005) analisa a taxa de convergência local do Método de Ponto Interior primal-dual factível com relação às restrições de desigualdade. O autor mostrou que

a taxa de convergência é q-quadrática quando as funções associadas às restrições de desigualdade definem uma região factível localmente côncava.

Oliveira (2005), apresentou uma nova classe de pré-condicionadores para a solução iterativa de sistema lineares que surgem da aplicação de métodos de pontos interiores. Os autores mostraram que um pré-condicionador para sistema reduzido produz um equivalente para o sistema aumentado, contudo não se aplica o inverso.

De forma objetiva, tem-se que o Método de Pontos Interiores Primal e Dual consiste que sejam definidos os seguintes pontos iniciais: parâmetro de barreira logarítmica  $\mu^0$ , variáveis primais  $X_0$  e  $C_0$  e variáveis duais  $A_0$  e  $B_0$ . O método consiste em um processo iterativo no qual se aproxima um ponto inicial  $(X_0, C_0, A_0, B_0)$  ao ponto de solução  $(X^*, C^*, A^*, B^*)$  através de uma sequência de pontos  $(X_k, C_k, A_k, B_k)$  que indica a trajetória percorrida durante o processo iterativo. A cada iteração  $k$  do método, o ponto de solução tem que satisfazer as condições de não negatividade:  $C_k, B_k \geq 0$ .

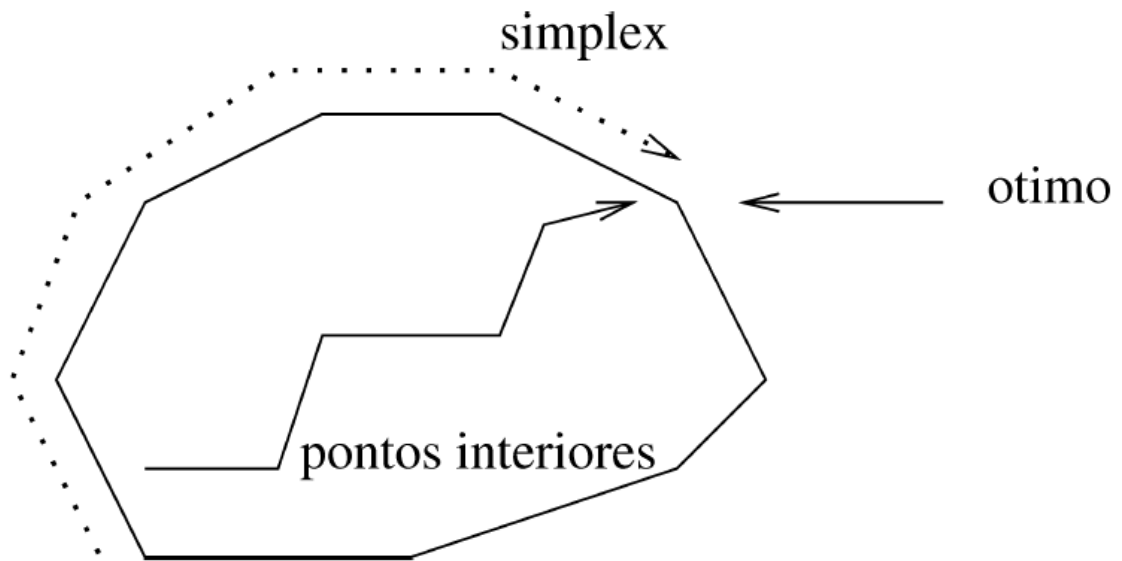
Definição:

- I) Ponto interior:  $X_0$  tal que  $X_0 > 0$  é o ponto interior do primal.
- II) Ponto factível:  $X_0$  tal que  $AX_0 = B$ ,  $X_0 \geq 0$  é um ponto factível do primal.
- III) Ponto interior factível:  $X_0$  tal que  $AX_0 = B$ ,  $X_0 > 0$  é um ponto interior factível do primal.
- IV) DIF: diferença entre o valor do primal e do dual.  $DIF = A^T X - B^T C$ .

A cada passo, o método faz a resolução do sistema linear  $(AB_k^* A^T)X_k = C_k$ . Observa-se que apenas a matriz diagonal  $B$  se altera a cada iteração. Logo, a estrutura de  $AB_k^* A^T$  fica preservada durante todo o processo. Este fato permite que se faça um pré-processamento simbólico da matriz para identificar quais elementos são estruturalmente nulos, ou seja, são iguais a zero em todas as iterações (Karmarkar, 1984).

A Figura 6 ilustra de forma sucinta a diferença entre os métodos simplex e o método dos pontos interiores para encontrar o ótimo.

**Figura 6. Simplex Vs Pontos interior**



### **3.8. Análise de Sensibilidade**

Um fator importante para avaliar um modelo matemático de otimização é fazer uma análise de sensibilidade das variáveis de decisão. Através da análise de sensibilidade (AS) é possível identificar os parâmetros que causam maior perturbação no desempenho do modelo. Deste modo, a AS é realizada com o objetivo de definir a influência de alguns parâmetros (*input*) nos resultados (*output*) do modelo.

As prioridades associadas às variedades de incertezas aos resultados obtidos nos processos de tomada de decisão são realizadas com a avaliação de vários critérios (VOOGD; 1983). Essas incertezas podem ser obtidas e avaliadas por meio de uma análise de sensibilidade que, segundo BUTLER(1997), determina a robustez das soluções obtidas no processo decisório.

MALCZEWSKI (1999) define essa análise como o procedimento para determinar como o curso das soluções, que se obteve com a priorização de áreas, pode ser modificado com alterações no início do processo de tomada de decisão. Ainda segundo esse autor, se as alterações não afetarem significativamente as saídas (soluções), o ordenamento pode ser considerado robusto. Se os resultados encontrados forem insatisfatórios, podem-se utilizar as informações de saída na etapa de formulação do problema.

NEARING (1990) apresenta as seguintes equações para avaliar a sensibilidade absoluta ( $S_a$ ) e relativa ( $S_r$ ) de um modelo:

$$S_a = \frac{\partial R}{\partial I} = \frac{R2 - R1}{I2 - I1} \quad (10)$$

$$S_r = \frac{\partial R}{\partial I} = \frac{\frac{R2 - R1}{R}}{\frac{I2 - I1}{I}} \quad (11)$$

Onde  $I2$  e  $I1$  correspondem ao maior e menor valor de parâmetros de entrada (*input*), respectivamente;  $R2$  e  $R1$  são os resultados referentes a  $I2$  e  $I1$ ; e  $R$  e  $I$  são os valores médios de  $R$  e  $I$ .

Para avaliar a sensibilidade dos resultados do modelo aos parâmetros de entrada é usado o método de variação nominal (consideram-se os extremos máximos e mínimos, geralmente encontrados na bibliografia de referência, para os parâmetros de entrada) da análise de sensibilidade. Neste método, o modelo é executado com base nos valores máximos e mínimos previstos para um dado parâmetro enquanto se mantêm os restantes parâmetros – valores nominais – constantes MORGAN e HENRION (1990).



## 4. MODELO MATEMÁTICO

Com o objetivo de apresentar uma proposta de solução para o problema do transporte de graneis líquidos originados pelas plataformas marítimas para as refinarias, foi desenvolvido um modelo matemático. O objetivo do problema é a redução dos custos de transportes associado às movimentações dos graneis líquidos (petróleo bruto) das plataformas. A depender de onde são extraídos estes petróleos os mesmos não podem ser misturados, o que implica que os compartimentos de petróleo devem ser preenchidos com um único tipo.

Na geração do modelo faz-se necessário a introdução de uma série de restrições associada às características dos navios, característica dos portos, dados de marés, capacidade de tanques, dentre outras.

O modelo matemático desenvolvido neste trabalho foi formulado como um problema de PLIM, sendo este implementado no *software* GAMS. Neste caso, os *solvers* utilizados foram o CPLEX e BONMIN.

Para um melhor entendimento do modelo proposto, inicialmente serão apresentados todos os índices, conjuntos, parâmetros e variáveis utilizadas; posteriormente serão apresentadas as restrições impostas ao modelo e a função objetivo utilizada.

### 4.1. Índices

$r$	Representa a rota composta pelas plataformas que foram selecionados para fazer parte de uma programação. O número de rotas pode variar de 1 a $m$ , onde $m$ dependerá do número de plataformas consideradas.
$n$	Representa um navio petroleiro integrante de uma frota. Cada navio está dividido em compartimentos, representados pelo índice $c$ , cuja soma dos mesmos fornece a capacidade total do navio ( $m^3$ ).
$c$	Representa um compartimento, que está associado a um navio $n$ .
$p$	Representa a plataforma ao qual será obstinada o petróleo bruto associada a uma produção.
$o$	Representa o tipo de óleo transportado pelo navio $n$ no compartimento $c$ .
$e$	Representa a refinaria que processará o óleo produzido pelas plataformas.

## 4.2. Conjuntos

$E$	Refinarias de destino do produto
$N$	Navios que compõem a frota.
$R$	Rotas viáveis.
$P$	Plataformas.
$C$	Compartimento de cada navio $n$ ;
$O$	Tipo de óleo a ser transportado.

## 4.3. Parâmetros

$Q_{máx_{eo}}$	Quantidade máxima de óleo processada pelas refinarias ( $m^3$ );
$Q_{mín_{eo}}$	Quantidade mínima da demanda a ser atendida por cada refinaria pela frota de navio ( $m^3$ );
$Ext_{po}$	Quantidade média de petróleo extraída pelas plataformas ( $m^3$ );
$Comp_{nc}$	Capacidade de cada compartimento ( $m^3$ );
$Atrac_n$	Tempo médio do navio $n$ para atracar em cada porto (dias);
$V_n$	Velocidade média de cada navio (milhas náuticas por hora);
$Pcom_r$	Comprimento do píer de atracação da refinaria (m);
$Pc_e$	Profundidade do calado de cada refinaria (m);
$com_n$	Comprimento do navio (m);
$cal_n$	Calado do navio (m);
$Cap_n$	Capacidade de cada navio ( $m^3$ );
$Ct_n$	Parcela do custo da operação do navio $n$ por unidade de tempo (em dias) de uso (unidade monetária);

$Cd_n$	Parcela do custo da operação do navio $n$ por unidade de distância (nó) percorrida pelo navio (unidade monetária);
$Ca_n$	Parcela do custo de atracamento (unidade monetária);
$Vaz_n$	Vazão do navio $n$ (m <sup>3</sup> /hora), os parâmetros temp2 e temp3 são calculados pelo parâmetro Vaz, através do cálculo $temp = m$ (quantidade de carga ou descarga) / Vaz (vazão de bombeamento);
$Temp1_{enr}$	Tempo que o navio $n$ gasta para percorrer a rota $r$ relacionado à distância (dias);
$Temp2_{enr}$	Tempo que o navio permanece atracado na plataforma (dias);
$Temp3_{enr}$	Tempo que o navio permanece atracado nas refinarias (dias);
$h$	Horizonte de tempo (tempo máximo para o navio $n$ completa sua rota) (dias);
$A_{er}$	Distância de cada rota $r$ ;
$W_{en}$	Número máximo de viagens do navio $n$ na rota $r$ .

#### 4.4. Variáveis

$Z_{enr}$	Variável binária (1 se o navio $n$ está indo para refinaria $e$ , presente na rota $r$ e 0 caso contrário);
$X_{enrco}$	Variável binária (1 se o óleo está sendo transportado pelo navio $n$ na rota $r$ pelo compartimento $c$ , e 0 caso contrário);
$M_{enrpo}$	Volume (m <sup>3</sup> ) de óleo $o$ transportado para refinaria $e$ pelo navio $n$ na rota $r$ , da plataforma $p$ .

## 4.5. Equações

### 4.5.1. Função Objetivo

A função objetivo a ser minimizada, Eq. (12), representa o custo mínimo necessário para que as demandas sejam satisfeitas, levando em consideração os custos por: distância, tempo total de viagem e tempo de atracação.

$$\text{Obj} = z_{\text{ren}} * \left( \sum_n \sum_e \sum_r \text{temp1}_{\text{enr}} c_{t_n} + \sum_n \sum_e \sum_r a_{\text{er}} c_{d_n} + c_{a_n} * (\text{temp2}_{\text{enr}} + \text{temp3}_{\text{enr}}) \right) \quad (12)$$

Onde a primeira parcela representa o custo relacionado ao tempo gasto pelo navio para percorrer a rota  $r$ , este custo está associado a despesas da tripulação durante a operação de transporte. A segunda parcela da equação é o custo relacionado a distância percorrida pelo navio na rota  $r$ , este custo é associa-se ao gasto de combustível e manutenção do navio. A terceira parcela da função objetivo relaciona ao custo médio para o navio atracar no porto e nas plataformas marítimas.

### Restrições

Deve ser atendida a necessidade de escoamento da produção de óleo da plataforma, de forma a garantir a produção contínua, função da vazão de produção média e do volume de óleo transportado, Eq. (13).

$$\sum_r \sum_n \sum_e w_{rn} * m_{\text{enrpo}} \leq \text{ext}_{po} \quad (13)$$
$$\forall p \in P, o \in O$$

O somatório das parcelas dos tempos de cada rota escolhida, deve ser menor ou igual ao horizonte de tempo, Eq. (14).

$$\sum_r \sum_e z_{ren} * (temp1_{enr} + temp2_{enr} + temp3_{enr}) \leq h \quad (14)$$

$$\forall n \in N$$

Os navios estão divididos em compartimentos  $e$ , em cada viagem, deve-se garantir que cada um deles será ocupado por apenas um tipo de produto, Eq. (15).

$$\sum_c \sum_o x_{enrco} \leq z_{ren} \quad (15)$$

$$\forall e \in E, n \in N, r \in R$$

O volume transportado por cada navio deve ser menor ou igual à capacidade do navio, Eq. (16).

$$cap_n * z_{enr} \geq \sum_p \sum_o m_{enrpo} \quad (16)$$

$$\forall re \in Re, n \in N, r \in R$$

O volume dos produtos transportados pelo navio para as refinarias pertencentes à rota deve ser menor ou igual à capacidade dos compartimentos, nos quais estes produtos foram alocados, Eq. (17).

$$\sum_n \sum_c comp_{nc} * x_{enrco} \geq \sum_p m_{enrpo} \quad (17)$$

$$\forall re \in Re, r \in R, o \in O$$

Para que um navio atraque deve-se levar em consideração a profundidade e o comprimento do berço de atracação. A Eq. (18) refere-se ao comprimento do navio; ou seja, o navio poderá atracar no porto se o seu comprimento for menor ou igual ao comprimento do berço de atracação.

$$\begin{aligned}
Z_{enr} * com_n &\leq Pc_e \\
\forall e \in E, r \in R, n \in N
\end{aligned}
\tag{18}$$

A Eq. (19) determina que o navio atracará no porto se o calado do navio for menor ou igual à profundidade do berço de atracação.

$$\begin{aligned}
Z_{enr} * cal_n &\leq Pc_e \\
\forall e \in E, r \in R, n \in N
\end{aligned}
\tag{19}$$

Para cada refinaria, o volume transportado deve ser menor ou igual ao volume máximo de óleo processado, Eq. (20).

$$\begin{aligned}
Qmín_{eo} &\leq \sum_p \sum_n \sum_r w_{rn} * m_{enrpo} \leq Qmáx_{eo} \\
\forall e \in E, o \in O
\end{aligned}
\tag{20}$$

Este equacionamento permite ao usuário variar diversas condições, como quantidade de plataformas e, conseqüentemente, o número de rotas, velocidade, capacidade, comprimento, calado e custos de operação das embarcações, demandas de cargas, etc.; ou seja, todos os dados de entrada são parâmetros e podem ser modificados, testados e avaliados pelo usuário.

## 5. RESULTADOS

O modelo representado pelas Eq. (12) a (20) permite identificar qual navio irá transportar determinado óleo associado à plataforma, em que rota, e para qual refinaria. O modelo foi implementado no software GAMS e aplicado a vários estudos de casos. A seguir, é apresentado um exemplo de aplicação do modelo desenvolvido.

Foi considerada uma frota heterogênea de navios de capacidades distintas, conforme mostra a Tabela 3. Cada navio possui uma velocidade diferente e é composto de  $n$  compartimentos. Cada compartimento transporta um determinado tipo de óleo, variando de acordo com seu grau API: se o grau API for baixo, o óleo pode ser misturado com outros que tenha característica parecida; se o grau API for alto, o óleo é transportado sem misturar com outros. Para cada plataforma o tempo para atracar, descarregar e desatracar são pré-determinados, considerando também que, ao término da viagem, o navio se encaminha a refinaria de destino final.

**Tabela 3.** Características dos navios.

Navios	Nº de Compartimentos	Capacidade (m³)	Vazão (m³/h)	Comprimento (m)	Vel (nó)	Calado (m)
Carioca	9	33.000	1100	156	13	8
Rebouças	9	34.000	1250	161	14	9
Rodeios	10	37.000	1300	174	14	9
Londrina	10	37.000	1200	180	13,5	9
jacaranca	9	42.000	1300	200	13,5	10

A partir do número de plataformas e refinarias, são geradas todas as rotas possíveis; obteve-se um total de 1020 rotas, às quais foram obtidas pela Eq. (21):

$$\sum_{j=1}^e j \sum_{i=1}^p 2^{i-1} \quad (22)$$

Fazendo o somatório para todas as origens (refinaria) e destinos (plataformas), onde  $e$  representa a quantidade de refinaria e  $p$  representa a quantidade de plataforma que se extrai o petróleo para atender a demanda das refinarias  $e$ . O número total de rotas geradas pelo modelo matemático é a soma das rotas de todas as origens, como mostra a Tabela 4.

**Tabela 4.** Geração das rotas.

Refinaria	Plataformas								
R	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
1	x	x	x	x	x	x	x	1	$2^7 = 128$
1	x	x	x	x	x	x	1		$2^6 = 64$
1	x	x	x	x	x	1			$2^5 = 32$
1	x	x	x	x	1				$2^4 = 16$
1	x	x	x	1					$2^3 = 8$
1	x	x	1						$2^2 = 4$
1	x	1							$2^1 = 2$
1	1								$2^0 = 1$
2	x	x	x	x	x	x	x	1	$2^7 = 128$
2	x	x	x	x	x	x	1		$2^6 = 64$
2	x	x	x	x	x	1			$2^5 = 32$
2	x	x	x	x	1				$2^4 = 16$
2	x	x	x	1					$2^3 = 8$
2	x	x	1						$2^2 = 4$
2	x	1							$2^1 = 2$
2	1								$2^0 = 1$
3	x	x	x	x	x	x	x	1	$2^7 = 128$
3	x	x	x	x	x	x	1		$2^6 = 64$
3	x	x	x	x	x	1			$2^5 = 32$
3	x	x	x	x	1				$2^4 = 16$
3	x	x	x	1					$2^3 = 8$
3	x	x	1						$2^2 = 4$
3	x	1							$2^1 = 2$
3	1								$2^0 = 1$
4	x	x	x	x	x	x	x	1	$2^7 = 128$
4	x	x	x	x	x	x	1		$2^6 = 64$
4	x	x	x	x	x	1			$2^5 = 32$
4	x	x	x	x	1				$2^4 = 16$
4	x	x	x	1					$2^3 = 8$
4	x	x	1						$2^2 = 4$
4	x	1							$2^1 = 2$
4	1								$2^0 = 1$
									1020

O custo médio relacionado à distância e ao tempo de percurso, de atraco nas plataformas marítimas e nos portos para este exemplo está relacionada pela Tabela 5. A Tabela 5 relaciona os tipos de óleos das plataformas que pode ser leve (API até 15), médio (API entre 15 e 26) e pesado (API acima de 26); junto com essa relação se tem a



quantidade média extraída de cada plataforma. Para Tabela 6, foi realizado um processo aleatório para as plataformas, referente as plataformas da bacia de campos e de santos.

**Tabela 5.** Custo associado aos navios (BNDES/AI/Geset).

Navios	Custo/Atracar (\$/dia)	Custo por	Custo diário (\$/dia)
		unidade de distância (\$/milha náutica)	
Carioca	5500,00	13,00	6000,00
Rebouças	6000,00	13,00	8000,00
Rodeios	5800,00	13,50	7500,00
Londrina	5800,00	14,00	8100,00
jacaranca	6000,00	15,00	8800,00

**Tabela 6.** Quantidade média de óleo produzido nas plataformas.

Plataformas	Produtos extraídos		
	Óleo leve (m <sup>3</sup> )	Óleo Médio (m <sup>3</sup> )	Óleo pesado (m <sup>3</sup> )
01	85000	-	-
02	-	-	75000
03	-	68000	-
04	-	70000	-
05	75000	-	-
06	-	70000	-
07	-	-	60000
08	-	95000	-

Para as refinarias tem-se que cada uma terá uma capacidade máxima de processamento. A Tabela 7, mostra volume máximo em m<sup>3</sup> processado por cada refinaria, já a tabela 8 mostra o volume mínimo da demanda a ser atendida para cada refinaria.

**Tabela 7.** Capacidade máxima de processamento das refinarias (m<sup>3</sup>).

Refinarias	Produtos processados		
	Óleo Leve (m <sup>3</sup> )	Óleo Médio (m <sup>3</sup> )	Óleo Pesado (m <sup>3</sup> )
Duque de Caxias	45.000	55.000	38000
Henrique Lajes	50.000	50.000	50.000
Paulina	55.000	55.000	53.000
Gabriel Passos	42.000	35.000	30.000

**Tabela 8.** Demanda mínima de óleo das refinarias (m<sup>3</sup>).

Refinarias	Produtos processados		
	Óleo Leve (m <sup>3</sup> )	Óleo Médio (m <sup>3</sup> )	Óleo Pesado (m <sup>3</sup> )
Duque de Caxias	15.000	15.000	18000
Henrique Lajes	20.000	20.000	20.000
Paulina	25.000	25.000	23.000
Gabriel Passos	12.000	10.000	15.000

Após a especificação dos parâmetros iniciais, foram usados *solvers* do software GAMS para resolução do modelo. Foi usado o *solver* CPLEX (Primal/Dual Simplex e Métodos Quadráticos) e o *solver* BONMIN (Método de Pontos Inteiros e Algoritmo de Barreira). O objetivo foi comparar o resultado fornecido por cada *solver*, bem como avaliar a robustez e eficiência dos métodos. O horizonte de tempo estabelecido foi de 50 dias, o critério para escolha deste parâmetro será mostrado na seção 5.1.

Das 1020 rotas geradas o modelo identifica 16 rotas associadas aos navios da frota, de acordo com a Tabela 9 pelo método CPLEX, e 17 rotas associadas aos navios da frota, de acordo com a Tabela 10 pelo método BONMIN. Essa escolha é feita através dos métodos de pesquisa operacional escolhidos associado aos *solvers* citados acima, chegando a um ótimo que tenha um menor custo operacional de transporte e atenda as restrições de processo, fazendo com que a escolha seja feita não só para encontrar o menor custo, mas também que entregue com menor tempo e a todos os pontos receptores.

**Tabela 9.** Rotas utilizadas pelo *solver* CPLEX.

Navio	Refinaria (origem)	Refinaria (destino)	Nº de vezes	Rotas	Distância (Mn)	Plataformas									
Carioca	Paulina	Paulina	1	Rota 32	1750	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Carioca	Paulina	H. Lajes	1	Rota 95	2300	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Rebocas	H. Lajes	H. Lajes	1	Rota 02	900	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rebocas	D. Caxias	D. Caxias	1	Rota 05	2000	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Rebocas	D. Caxias	D. Caxias	1	Rota 18	1700	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Rebocas	G. Passo	G. Passos	1	Rota 29	1800	0	0	0	0	0	0	1	0
Rodeio	Paulina	Paulina	1	Rota 11	2500	0	0	1	0	0	0	0	0
Rodeio	Paulina	Paulina	1	Rota 24	1650	0	0	0	0	0	1	0	0
Rodeio	Paulina	H.Lajes	1	Rota 15	2000	0	0	0	1	0	0	0	0
Rodeio	G. Passos	G. Passos	1	Rota 29	1800	0	0	0	0	0	0	1	0
Londrina	H. Lajes	H. Lajes	1	Rota 15	2000	0	0	0	1	0	0	0	0
Londrina	Paulina	Paulina	1	Rota 32	1750	0	0	0	0	0	0	0	1
Londrina	Paulina	Paulina	1	Rota 24	1650	0	0	0	0	0	1	0	0
Jacaranca	D. Caxias	D. Caxias	1	Rota 05	2000	0	1	0	0	0	0	0	0
Jacaranca	D. Caxias	D. Caxias	1	Rota 18	1700	0	0	0	0	1	0	0	0
Jacaranca	D. Caxias	Paulina	1	Rota 176	2600	1	0	1	0	0	0	1	0

**Tabela 10.** Rotas utilizadas pelo *solver* BONMIN.

Navio	Refinaria (origem)	Refinaria (destino)	Nº de vezes	Rotas	Distância (Mn)	Plataformas							
Carioca	H. Lajes	H. Lajes	1	Rota 02	900	1	0	0	0	0	0	0	0
Carioca	H. Lajes	Paulina	1	Rota 32	1750	0	0	0	0	0	0	0	1
Rebocas	Paulina	Paulina	1	Rota 11	2500	0	0	1	0	0	0	0	0
Rebocas	Paulina	Paulina	1	Rota 32	1750	0	0	0	0	0	0	0	1
Rebocas	Paulina	G. Passos	1	Rota 21	1100	0	0	0	0	1	0	0	0
Rebocas	G. Passos	G. Passos	1	Rota 29	1800	0	0	0	0	0	0	1	0
Rodeio	Paulina	Paulina	1	Rota 11	2500	0	0	1	0	0	0	0	0

Rodeio	Paulina	Paulina	1	Rota 16	2050	0	0	0	1	0	0	0	0
Rodeio	Paulina	Paulina	1	Rota 24	1650	0	0	0	0	0	1	0	0
Rodeio	H. Lajes	H.Lajes	1	Rota 15	2000	0	0	0	1	0	0	0	0
Londrina	H. Lajes	H. Lajes	1	Rota 02	900	1	0	0	0	0	0	0	0
Londrina	D. Caxias	D. Caxias	1	Rota 18	1700	0	0	0	0	1	0	0	0
Londrina	Paulina	Paulina	1	Rota 24	1650	0	0	0	0	0	1	0	0
Londrina	Paulina	Paulina	1	Rota 32	1750	0	0	0	0	0	0	0	1
Jacaranca	D. Caxias	D. Caxias	1	Rota 66	1900	0	1	0	0	1	0	0	0
Jacaranca	H. Lajes	H. Lajes	1	Rota 02	900	1	0	0	0	0	0	0	0
Jacaranca	H. Lajes	H. Lajes	1	Rota 151	2500	1	1	0	0	0	1	0	0

O navio Carioca teve um tempo total de 31,89 dias, o navio Rodeio levou a carga em um tempo 46,17 dias, o navio Rebocas foi de 48,63 dias, o navio Londrina 39,48 dias e o navio Jacaranca foi de 42,29 dias para o solver CPLEX, como mostra a Tabela 11. Já para o solver BONMIN foi estabelecido para o navio Carioca teve um tempo total de 25,40 dias, o navio Rodeio levou a carga em um tempo 48,03 dias o navio Rebocas foi de 49,63 dias, o navio Londrina 47,64 dias e o navio Jacaranca foi de 37,76 dias, de acordo com a Tabela 12. O tempo das tabelas é dividido por rotas percorrida para cada navio; essas rotas são divididas em três tempos. O primeiro é associado ao tempo de percurso, que seria o tempo total de deslocamento do navio até a plataforma e o tempo total de deslocamento do navio da plataforma até o porto associado a refinaria que receberá o petróleo. O segundo é o tempo associado ao bombeamento de petróleo da plataforma ao navio petroleiro e o terceiro o descarregamento do petróleo bruto ao porto associado a refinaria.

**Tabela 11.** Tempo necessário de escoamento dos óleos produzidos nas plataformas *solver* CPLEX.

Navio	Rota	Tempo viagem (ida e volta, dias)	Tempo em plataforma (dias)	Tempo em refinaria (dias)	Tempo total (dias)
Carioca	Rota 32	8,10	3,27	3,30	31,89
	Rota 95	10,65	3,27	3,30	
Rebocas	Rota 02	4,17	2,0	2,31	46,17
	Rota 05	9,25	2,0	2,31	
	Rota 18	7,18	2,0	2,31	
	Rota 29	8,33	2,0	2,31	
Rodeio	Rota 11	10,41	1,88	2,0	48,63
	Rota 15	8,33	1,88	2,0	
	Rota 24	6,87	1,88	2,0	
	Rota 29	7,50	1,88	2,0	
Londrina	Rota 15	8,33	2,38	3,28	39,48
	Rota 24	6,88	2,38	3,28	
	Rota 32	7,29	2,38	3,28	
Jacaranca	Rota 05	9,25	2,0	2,40	42,29
	Rota 18	7,87	2,0	2,40	
	Rota 176	11,87	2,0	2,40	

As quantidades transportadas pelos navios são apresentadas na Tabela 13 e 14, onde inclui os óleos com baixo, médio e alto API. Não podendo haver mistura de óleos com uma diferença grande no grau API nos reservatórios do navio, pois pelo API tem-se qual tipo de refino será realizado no petróleo e como ocorrerá a operação de transporte para atender a demanda.

**Tabela 12.** Tempo necessário de escoamento dos óleos produzidos nas plataformas *solver* BONMIN.

Navio	Rota	Tempo viagem (ida e volta, dias)	Tempo em plataforma (dias)	Tempo em refinaria (dias)	Tempo total (dias)
Carioca	Rota 02	4,16	3,27	3,30	25,40
	Rota 32	8,10	3,27	3,30	
Rebocas	Rota 11	11,58	2,0	2,31	48,03
	Rota 21	5,09	2,0	2,31	
	Rota 29	6,02	2,0	2,31	
	Rota 32	8,10	2,0	2,31	
Rodeio	Rota 11	10,41	1,88	2,0	49,67
	Rota 15	8,33	1,88	2,0	
	Rota 16	8,54	1,88	2,0	
	Rota 24	6,87	1,88	2,0	
Londrina	Rota 02	3,75	2,38	3,28	47,64
	Rota 18	5,91	2,38	3,28	
	Rota 24	6,88	2,38	3,28	
	Rota 32	7,29	2,38	3,28	
Jacaranca	Rota 02	4,17	2,0	2,40	37,76
	Rota 66	8,79	2,0	2,40	
	Rota 151	11,57	2,0	2,40	

**Tabela 13.** Volume de óleo transportado pelos navios *solver* CPLEX.

Navios	Rota	Plataforma	Óleo Leve (m <sup>3</sup> )	Óleo Médio (m <sup>3</sup> )	Óleo Pesado (m <sup>3</sup> )
Carioca	32	08	-	33527	-

	95	03	-	3484	-
		08	-	26176	-
Rebocas	02	01	33527	-	-
	05	02	-	-	33527
	18	05	33527	-	-
	29	07	-	-	24705
Rodeio	11	03	-	35295	-
	15	04	-	34705	-
	24	06	-	34705	-
	29	07	-	-	35295
Londrina	15	04	-	35295	-
	24	06	-	35295	-
	32	08	-	35295	-
Jacaranca	05	02	41473	-	-
	18	06	-	-	41473
	176	01	9178	-	-
		03	-	31221	-

**Tabela 14.** Volume de óleo transportado pelos navios *solver* BONMIN.

Navios	Rota	Plataforma	Óleo Leve (m³)	Óleo Médio (m³)	Óleo Pesado (m³)
Carioca	02	01	-	33527	-
	32	08	-	33527	-
Rebocas	11	03	-	32705	-
	21	04	33527	-	-
	29	07	-	-	33527
	32	08	-	33527	-
Rodeio	11	03	-	35295	-
	15	02	-	35295	-
	16	04	-	34705	-
	24	06	-	34705	-
Londrina	02	01	35295	-	-
	18	05	35295	-	
	24	06	-	34705	-
	32	08	-	35295	-
Jacaranca	02	02	16178	-	-
	66	02	-	-	32705
	66	05	6178		
	151	02	-	-	42295

O valor da função objetivo para o problema, assim como informações sobre o número de variáveis, número de interações e nós avaliados, são apresentados nas Tabelas 15 e 16.

Pelos dados apresentados nas tabelas, observa-se que para esse problema específico de transporte de petróleo, o *solver* CPLEX apresenta menor tempo de CPU e um número menor de interações e nós; já o *solver* BONMIN se mostrou menos eficiente exigindo um número maior de interações e de nós para minimizar o custo e atender as demandas operacionais, chegando a um ótimo um pouco diferente daquele encontrado pelo *solver* CPLEX.

Os resultados mostraram que o ótimo local do *solver* CPLEX ficou mais próximo de um ótimo global que o *solver* BONMIN, isso acontece pela densidade das colunas na região factível do problema estudado, já que o método simplex analisa a fronteira da região e o método de pontos interiores, faz análises iterativa dos pontos internos à região factível tornando assim mais lento e mais difícil chegar ao ponto de mínimo do problema proposto. Mas para garantir que esse ótimo seja realmente próximo do ótimo global é necessário fazer uma análise de sensibilidade, à qual será apresentada a seguir.

**Tabela 15.** Dados finais do problema apresentado pelo *solver* CPLEX.

	Número de equações	Número de variáveis	Interações	Nós avaliado	Função objetiva (\$)	Tempo CPU (min)
Exemplo estudado	95508	205524	195338	517	1450523,48	2,1

**Tabela 16.** Dados finais do problema apresentado pelo *solver* BONMIN.

	Número de equações	Número de variáveis	Interações	Nós avaliado	Função objetiva (\$)	Tempo CPU (min)
Exemplo estudado	95508	205524	595518	4201	1684523,48	15,2



## 5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Os parâmetros de um modelo de programação linear são apenas estimativas de quantidades (por exemplo, lucros) que não podem ser determinadas com precisão na altura em que se desenvolve o modelo. Uma análise permite identificar até que ponto as estimativas devem ser precisas para se evitar obter uma solução ótima errada, ou seja, quais os parâmetros sensíveis requerem um cuidado particular na realização das estimativas.

Se as condições presentes quando se desenvolveu o modelo se alterarem após a sua implementação, a análise de sensibilidade permite saber se essas alterações significam uma mudança na solução ótima. Quando alguns parâmetros do modelo representam decisões de gestão, a análise de sensibilidade providencia uma ajuda fundamental a cerca do impacto que as alterações de política têm sobre o problema.

Foi analisado o grau de influencia de alguns parâmetros sobre a função objetiva, custo operacional e número de interações para se aproximar do ótimo. A análise foi realizada apenas para o *solver* que teve uma melhor performance no problema proposto, o solver CPLEX.

O parâmetro com maior influência sobre o modelo matemático é o horizonte da janela de tempo, definido de modo que a frota de navio atendesse a demanda estabelecida e respeitando as restrições operacionais do modelo, como será demonstrado na Tabela 20. Os outros parâmetros tiveram um impacto menor sobre o modelo matemático: será mostrada a análise de sensibilidade individual de alguns parâmetros, realizada de modo que todos os outros parâmetros permanecessem constantes e iguais aos valores das tabelas dos resultados mostradas anteriormente.

A Tabela 17 mostra a análise de sensibilidade a respeito das características da vazão de bombeamento médio da frota selecionada, variando a vazão mínima 1100 m<sup>3</sup>/h até a máxima 1350 m<sup>3</sup>/h.

A Tabela 18 mostra o número de iterações, nós avaliados pelo modelo, tempo de CPU e a função objetiva variando com a velocidade média da frota dos navios da frota onde a velocidade mínima é 12 nó e a máxima é de 15 nó.

A Tabela 19 mostra a variação com a capacidade de armazenamento médio da frota dos navios da frota onde o mínimo é 35 m<sup>3</sup> e o máximo de 40 m<sup>3</sup>.

**Tabela 17.** Análise de sensibilidade da vazão de bombeamento.

<b>Vazão de bombeamento médio da frota (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Iterações</b>	<b>Nós avaliado</b>	<b>Função objetivo (\$)</b>	<b>Tempo CPU (min)</b>
1100	234781	563	1.531.213,40	3,2
1150	197653	522	1.471.512,91	2,3
<b>1200</b>	<b>195338</b>	<b>517</b>	<b>1.450.523,48</b>	<b>2,1</b>
1250	190132	510	1.460.483,91	1,9
1350	180302	501	1.490.332,15	1,5

**Tabela 18.** Análise de sensibilidade da velocidade do navio.

<b>Velocidade média da frota (nó)</b>	<b>Iterações</b>	<b>Nós avaliado</b>	<b>Função objetivo (\$)</b>	<b>Tempo CPU (min)</b>
12	243683	570	1.563.273,31	3,2
13	196891	521	1.479.614,01	2,3
<b>13,75</b>	<b>195338</b>	<b>517</b>	<b>1.450.523,48</b>	<b>2,1</b>
14	193842	511	1.456.001,71	2,0
15	180302	471	1.490.332,15	1,2

**Tabela 19.** Análise de sensibilidade da capacidade média do navio.

<b>Capacidade média da frota (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Iterações</b>	<b>Nós avaliado</b>	<b>Função objetivo (\$)</b>	<b>Tempo CPU (min)</b>
35	263683	623	1.591.073,31	4,0
36,5	200990	554	1.509.614,01	2,3
<b>38,2</b>	<b>195338</b>	<b>517</b>	<b>1.450.523,48</b>	<b>2,1</b>
39	194911	513	1.458.201,02	1,9
40	185501	498	1.490.332,15	1,6

## 5.1 Análise de Sensibilidade acerca do horizonte de tempo estabelecido

A análise de sensibilidade do modelo teve um maior foco na janela de tempo e como este valor escalar modifica a função objetivo e como difícil será atender as restrições modificando esse parâmetro.

De acordo com a Tabela 20, observa-se que à medida que a janela de tempo se afasta do horizonte de 50 dias pela esquerda, apesar do tempo da demanda ser menor, a sua função objetivo aumenta de forma significativa e, com isso, o custo operacional da operação cresce rapidamente, pois terá menos opções de rotas para atender a demanda estabelecida. Já se afastando de 50 dias pela direita o custo diminui lentamente, não sendo viável se afastar muito desse ponto para este parâmetro, já que a entrega do produto em um tempo menor também é fundamental para este tipo de operação. Por essa razão foi fixado 50 dias como sendo o horizonte de tempo para a operação de transporte estudada.

**Tabela 20.** Análise de sensibilidade da janela de tempo.

<b>Horizonte de tempo (dias)</b>	<b>Iterações</b>	<b>Nós avaliado</b>	<b>Função objetivo (\$)</b>	<b>Tempo CPU (min)</b>
35*	-	-	<i>infeasible</i>	-
40	721135	2112	2.315.701,02	56,2
45	375651	912	1.704.807,61	14,6
<b>50</b>	<b>195338</b>	<b>517</b>	<b>1.450.523,48</b>	<b>2,1</b>
55	180302	486	1.410.332,15	1,8
60	180122	479	1.396.122,10	1,7

\* Não houve solução viável que atendesse as restrições operacionais.

## **6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Atualmente o petróleo é o bem mais valioso devido a sua importância do cenário mundial, seu transporte deve ter um acompanhamento logístico cauteloso para não acarretar custos elevados na operação; também deve ser transportado com cuidado para não ocasionar desastres ambientais.

O presente trabalho teve por finalidade estudar um modelo matemáticos para resolução de problema relacionado a redução do custo do transporte marítimo. A partir da modelagem, foi possível simular problemas de escoamento de produção do óleo, desde as plataformas petrolíferas até as refinarias. Dentro de uma frota de navio, com navios de característica diferentes, o modelo desenvolvido é capaz de identificar, em um conjunto de navios, qual embarcação deverá ser selecionada e a quantidade de produto irá transportar em cada um dos seus tanques, assim como a rota que represente o melhor caminho. Também mostra quanto de óleo será transportado das plataformas para as refinarias, sempre atendendo o prazo estabelecido em relação ao tempo de entrega e minimizando cada parcela de custo, que está associada à distância, tempo e ao atracamento do navio.

O modelo matemático utilizando a PLIM do presente trabalho atendeu as expectativas de forma teórica se mostrando uma excelente ferramenta no auxílio para o planejamento de transporte de petróleo extraído das plataformas marítimas, diminuindo de forma considerável o custo total de transporte marítimo.

O software GAMS, representa um excelente meio de elaboração de modelos de otimização, demonstrando grande capacidade para aplicações na otimização da operação de transporte. A sua aplicação no caso em estudo, observou-se que a alternativa onde foi estabelecida a janela de tempo de 50 dias, para que a frota atenda a demanda, se constatando a realização da otimização, apresentou os melhores resultados, possibilitando um menor custo operacional e atendendo os requisitos necessários para o transporte realizado.

## **7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

Em todas as pesquisas realizadas, notou-se que o sistema logístico do transporte de petróleo é bem amplo e o trabalho em questão não esgota o tema abordado. Novos estudos sobre os modais de transporte, para fazer novas verificações sobre qual ou quais modais prevalecem no transporte de petróleo, devem ser realizados de modo a melhorar a infraestrutura do nosso país. Também é possível destacar para estudos futuros, o estabelecimento de uma interface com o usuário e o presente estudo e, por fim, a implementação de algoritmos genéticos para comparar os resultados com os atuais métodos utilizados.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABADIE J. C 1969. Generalization of the Wolfe Reduced Gradient Method to the Case of Non-linear constraints. In: Optimization. Academic Press. New York.

ACCIOLY. R. M. Simulando operações de manutenção em poços de petróleo. 2000. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

ALCOFORADO, M.A.P. 2003. Comunicação Pessoal. Monografia, USP, São Paulo.

ANP (Agência Nacional do Petróleo). 2005. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo e do Gás Natural.

ANP (Agência Nacional do Petróleo). 2014. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo e do Gás Natural.

ANTAQ (Agência Nacional de Transporte Aquaviário). 2008. Anuário Estatístico dos Transportes, Ministério dos Transportes, Brasília.

BALLOU, R. H. 1993. Logística empresarial. São Paulo: Atlas, Brasil.

BALLOU, R. H. 1995. Business Logistics Management: Planning and Control. Prentice Hall, 2ª edição. New Jersey.

BODINGTON, C. E. 1995. Planning, scheduling, and control integration in the process industries. *McGraw-Hill*

BRAGA, B. 2005. Introdução à Engenharia Ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável. Pearson Prentice Hall São Paulo.

BRASIL ENERGIA . Revista, nº 262, setembro 2002.

BRASIL, N.I , ARAÚJO, M.A.S., DE SOUSA, E.C.M. 2011 Processamento Primário de Petróleo e Gás. LTC Rio de Janeiro.

BROOKE, A., KENDRICK, D., MEERAUS P. A. GAMS - A user's guide, The Scientific Press.

BUTLER J, JIA J, DYER J. 1997. Simulation techniques for the sensitivity analysis of multi-criteria decision models. *European Journal of Operational Research*, London.

- CARDOSO, L. C. 2005 Petróleo do poço ao posto. Qualitymark, Rio de Janeiro.
- CARDOSO, L. C. 2008. Logística do Petróleo: Transporte e Armazenamento. Interciência, Rio de Janeiro:
- CHRISTOPHER, M. 1997. Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos. 1ª ed. São Paulo: Pioneira.
- CHIYOSHI, F. Y. 2002. Simulando operações de manutenção em poços de petróleo. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ – Prog. Eng. Produção. Rio de Janeiro.
- DORING, R. 1998. Desenvolvimento gerencial. Dissertação de mestrado, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo.
- EPPEN, G.D. 1998. Introductory management science. Prentice Hall.
- FAGERHOLT, K. 2001. Ship scheduling with soft time windows: an optimization based Approach. European Journal of Operational Research, 20.
- FAGERHOLT, K. 2000. Evaluating the trade-off between the level of customer service and transportation cost in a ship scheduling problem. Maritime Policy Management, 27(2):145 -153.
- FARIAS, R. F. 2008. Introdução à química do petróleo. Ciência Moderna, Rio de Janeiro.
- FRONAPE. 2006. Plano de emergência para derrames de hidrocarbonetos. PETROBRAS-FRONAPE, Inspetoria Geral, Rio de Janeiro.
- HARTMANN, J.C.M. 1999. Is your refinery model balanced Hydrocarbon Processing, tese de doutorado, *Trondheim, Norway*
- INTERTANKO (The International Association of Independent Tanker Owners).site internet: [www.intertanko.com/search/artikkel.asp?id=3701](http://www.intertanko.com/search/artikkel.asp?id=3701), acesso em 12/09/2008.

JETLUND A. & KARIMI I.A. 2004. Improving the Logistics of Multi-compartment. Chemical Tankers. Computers and Chemical Engng, 28, 1267-1283.

KARMAKAR, N. A 1984. *New polynomial time algorithm for linear programming. Combinatorica.*

KLINGMAN. Darwin. 1989. Combining recent advances in information and optimization technologies for competitive advantage in the downstream petroleum industry. Proceedings of the Shell conference on logistics, Apeldoorn, the Netherlands.

LISBOA, E. *Apostila de Pesquisa Operacional*, 2002. Disponível em: <[http://www.decom.ufop.br/prof/rduarte/CIC271/apostila\\_po.pdf](http://www.decom.ufop.br/prof/rduarte/CIC271/apostila_po.pdf)> Acesso em: 20 de Maio. 2011.

MALCZEWSKI J. 1999. GIS and multicriteria decision analysis. John Wiley, 362p. New York.

MARIELLE, C.; KJETIL F. 2002. Ship routing and scheduling: status and perspectives. Norwegian University of science and technology Trondheim, Norway.

MARIANO, J. B. 2001. Impactos ambientais do refino de petróleo. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio De Janeiro.

MASSERON, J. 1990. Petroleum Economics. 4 ed. Ed. Technip. 131.

MÁS R. 1998. scheduling de óleo cru de curto prazo: técnica de programação mista Inteira. Disponível em: [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br) , acesso em 15/03/2008

MENEZES, J. D. 2000. Uma plataforma para expedição de combustíveis. Departamento de engenharia de produção, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Santa Catarina.

MORGAN, M, G. HENRION, M. 1990. Uncertainty. A guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis, Cambridge University Press, London.

MURACT, A, E. 2008. *Scheduling* de escoamento de petróleo bruto das plataformas marítimas e atendimento a centros consumidores. Dissertação de mestrado,



Universidade Federal de Alagoas, UFAL, mestrado em modelagem computacional, Alagoas.

NEARING, M, A, DEER, ASCOUGH, L. LAFLEN, J, M. (1990). Sensitivity analysis of the WEPP hill slope profile erosion model. *TASAE*.

NEIVA, J. 1986. Conheça o petróleo. 1 ed, Editora Ao Livro Técnico. Rio de Janeiro.

NOVAES, A. G. 2007. Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição. 4. ed. Elsevier. Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, J.P. 1993. Análise do gerenciamento de riscos ambientais do transporte marítimo de petróleo e derivados no Estado do Rio de Janeiro. Tese doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

ONO, R. T. 2001. Estudo de viabilidade do transporte marítimo de contêineres por cabotagem na costa brasileira, *Departamento de Engenharia Naval, Escola Politécnica da USP*, São Paulo.

PAPADAKIS, N.; PERAKIS, A. 1989a Minimal time vessel routing in a time-dependent environment. *Transportation Science*, 23(4):266 -276.

PAPADAKIS, N.; PERAKIS, A. 1989b. A nonlinear approach to the multiorigin, multidestination fleet employment problem. *Naval Research Logistics*, 36:515 -528.

PRESS, FRANK 2006. Para entender a terra. 4 ed. Bookman Porto Alegre.

PUCU, P, A, B. 2009. Distribuição de graneis líquido na costa brasileira através de uma frota de navios. Monografia, Universidade Federal de Alagoas, UFAL, Engenharia Química, Alagoas.

PUCU, P, A, B. 2011. Logística do escoamento da produção de petróleo de plataformas offshore via transporte naval. Dissertação, Universidade Federal de Alagoas, UFAL, Engenharia Química, Alagoas.

PUCU, P, A, B. SOLETTI, J, I e CARVALHO, S, H. Distribuição de petróleo das plataformas marítima via transporte naval. Apresentado no CILANCE 2010, Búzios, Rio de Janeiro

RIBEIRO, S.K.; COSTA, C.V.; DAVID, E.G.; REAL, M.V.; D'AGOSTO, M.A. 2000 Transporte e mudanças climáticas. Apresentado no CBEA, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro.

SARACENI, P. P. 2006. Transporte marítimo de petróleo e derivados. Interciência. Rio de Janeiro.

SIMÕES. C. P. 2002. A logística reversa aplicada à exploração e produção de petróleo, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Engenharia de Produção, Santa Catarina.

SILVA, G.H. 1996. Percepção ambiental da indústria de petróleo no litoral brasileiro. *Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos UFSCs, São Carlos.*

SINDICOM, 2007. Estatísticas das Associadas. Disponível em <http://www.sindicom.com.br/>.

SORDI, J. O. 2005. otimização de processos portuários a partir da aplicação de recursos de tecnologia da informação análise do porto de santos, Dissertação de mestrado, Universidade Católica de Santos, Gestão de negócios, Santos.

SPERANZA. 1992. Minimizing transportation and inventory costs for several products on single link. *Operations Research*, 42:879 -894.

SPERANZA; UKOVICH. 1996 An algorithm or optimal shipments with given frequencies. *Naval Research Logistics*, 43:655 -671.

TEIXEIRA, W. S. 1995. Uma linguagem visual de interação sobre gráficos quantitativos em aplicação computacionais. Dissertação de mestrado, COPPE, Rio de Janeiro.

THOMAS, José Eduardo, 2004. Fundamentos de engenharia de petróleo. PETROBRAS. Rio de Janeiro.

TRANSPETRO. 2009. Site internet [www.transpetro.com.br](http://www.transpetro.com.br) Acesso em Fevereiro/2009

UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development). 2003. Review of Maritime Transport, UNCTAD/RMT/2003, Organização das Nações Unidas, Gênova.

VOOGD, H. Multicriteria evaluation for urban and regional planning. Pion, 1983. 125p. London.

WALISIEWICZ, M. 2008. Energia alternativa. Mais ciência, São Paulo.

**ANEXO 1 – Características dos navios da FRONAPE.**

Navio	Ano	TPB	Capacidade Volumétrica* (m <sup>3</sup> )	Casco duplo	Lastro Segregado	Produto transportado
Ataulfo Alves	2000	153.000	166.392	Sim	Sim	Petróleo
Avaré	1975	28.903	32.146	Não	Não	Navio cisterna
Bagé	1985	91.647	100.896	Não	Sim	Petróleo/Prod utos escuros
Bicas	1985	91.671	100.896	Não	Sim	Petróleo/Prod utos escuros
Brotas	1985	91.902	100.896	Não	Sim	Petróleo/Prod utos escuros
Camocim	1986	18.900	19.193	Não	Sim	Petróleo/Prod utos escuros
Candiota	1990	18.799	19.231	Não	Sim	Petróleo/Prod utos escuros
Cantagalo	1990	18.835	19.231	Não	Sim	Petróleo/Prod utos escuros
Carangola	1989	18.823	19.231	Não	Sim	Petróleo/Prod utos escuros
Caravelas	1986	18.922	19.193	Não	Sim	Petróleo/Prod utos escuros
Carioca	1986	18.997	33.000	Não	Sim	Petróleo/Prod utos escuros
Cartola	2000	153.000	166.392	Sim	Sim	Petróleo
Dílya	1980	18.074	22.684	Não	Sim	Produtos claros
Diva	1980	18.012	22.684	Não	Sim	Produtos claros
Grajaú	1987	8.875	8.142	Não	Sim	Gases
Guaporé	1982	4.490	6.202	Não	Sim	Gases

<b>Navio</b>	<b>Ano</b>	<b>TPB</b>	<b>Capacidade Volumétrica* (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Casco duplo</b>	<b>Lastro Segregado</b>	<b>Produto transportado</b>
Guará	1981	4.494	6.202	Não	Sim	Gases
Guarujá	1981	4.514	6.202	Não	Sim	Gases
Gurupá	1987	8.907	8.136	Não	Sim	Gases
Gurupi	1987	8.891	8.149	Não	Sim	Gases
Itabuna	1993	44.555	46.746	Sim	Sim	Produtos claros
Itaituba	1996	44.138	49.965	Sim	Sim	Produtos claros
Itajubá	1993	44.555	46.746	Sim	Sim	Produtos claros
Itamonte	1995	44.138	46.965	Sim	Sim	Produtos claros
Itaperuna	1994	44.555	46.746	Sim	Sim	Produtos claros
Jurupema	1977	131.584	154.873	Não	Não	Navio cisterna
jacaranca	2005	43.456	42.000	sim	sim	Petróleo/Prod utos escuros
Lages	1991	29.995	34.969	Não	Sim	Petróleo/Prod utos escuros
Lambari	1993	29.995	34.969	Não	Sim	Produtos claros
Lavras	1992	29.995	34.969	Não	Sim	Produtos claros
Lindóia BR	1996	44.582	42.386	Sim	Sim	Produtos claros
Livramento	1997	44.583	42.386	Sim	Sim	Produtos claros

<b>Navio</b>	<b>Ano</b>	<b>TPB</b>	<b>Capacidade Volumétrica* (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Casco duplo</b>	<b>Lastro Segregado</b>	<b>Produto transportado</b>
Lobato	1993	44.600	42.770	Sim	Sim	Produtos escuros e claros
Londrina	1994	45.229	37.000	Sim	Sim	Produtos escuros e claros
Lorena BR	1996	45.229	42.770	Sim	Sim	Petróleo/Prod utos escuros
Maracá	1981	133.752	156.584	Não	Não	Petróleo
Maruim	1980	133.752	156.584	Não	Não	Petróleo
Maísa	1980	18.078	22.684	Não	Sim	Produtos claros
Marta	1981	17.935	22.684	Não	Sim	Produtos claros
Muriaé	1979	133.752	156.584	Não	Não	Petróleo
Nara	1982	17.859	22.684	Não	Sim	Produtos claros
Neusa	1983	17.909	22.684	Não	Sim	Produtos claros
Nilza	1981	17.999	22.684	Não	Sim	Produtos claros
Norma	1982	17.878	22.684	Não	Sim	Produtos claros
Pedreiras	1993	55.067	65.142	Sim	Sim	Produtos escuros e claros
Piquete	1989	66.876	67.379	Sim	Sim	Produtos escuros e claros

<b>Navio</b>	<b>Ano</b>	<b>TPB</b>	<b>Capacidade Volumétrica* (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Casco duplo</b>	<b>Lastro Segregado</b>	<b>Produto transportado</b>
Piraí	1990	66.672	67.379	Sim	Sim	Produtos escuros e claros
Potengi	1991	55.067	65.145	Sim	Sim	Produtos escuros e claros
Poti	1996	55.067	65.142	Sim	Sim	Petróleo/Prod utos escuros
Rebouças	1989	34.651	34.000	Não	Sim	Petróleo/Prod utos escuros
Rodeio	1990	34.551	33.678	Não	Sim	Petróleo/Prod utos escuros